

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A OVĚŘENÍ RÁDIOVÉ SÍTĚ TYPU MESH PRO BEZ LICENČNÍ PÁSMO

DESIGN AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF MESH TYPE RADIO NETWORK FOR NON-LICENSED
BANDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Váňa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Fujdiak

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Martin Váňa

ID: 173774

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a ověření rádiové sítě typu MESH pro bez licenční pásmo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracuje teoretický úvod do problematiky rádiových sítí (různé frekvence, modulace, šířka pásmo, potřebné licence, standardy, technologie, aj.). Zaměřte se na komunikační technologii IQRF, konkrétně na vývojový kit DS-DPA-02 a bránu GW-ETH-02A(72D). Prostudujte možnosti cloudových řešení pro technologii IQRF, jedno řešení vyberte pro využití ve vlastní síti. V praktické části sestavte a ověřte komunikační síť IQRF za pomoci zmíněných HW prvků a cloudu. Ve vytvořené síti následně proveďte experimentální měření technologie v různých prostředích – podzemí, vnitřní i venkovní prostory, aj. (s přihlédnutím na možnosti měření – tedy zpoždění, síla signálu aj.). Praktická měření budou teoreticky podložena např. výpočty max. síly signálu či simulacemi. Výstupem práce bude teoretický základ, funkční IQRF síť, experimentální výsledky z měření prokazující vlastnosti technologie a příp. vybrané teoretické výpočty či simulace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] IQRF. „GW-ETH-02A: IQRF Ethernet Gateway“. Firmware v2.80, User's guide, 2016.

[2] IQRF. „IQRF: Quick Start Guide“. For IQRF OS 3.07D+ and IQRF IDE v4.30+, 2015.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Radek Fujdiak

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu MESH sítě pod technologií IQRF. V úvodní části jsou rozebrány základní techniky radiového přenosu, na které navazují technologie zde používané. Druhá kapitola je věnována představení IQRF, jeho základním parametrům a používaným zařízením, včetně možností cloudu. Třetí část práce se věnuje návrhu topologie a metodologii měření. Poslední část se zaměřuje na ověřování a experimentální měření parametrů IQRF sítě v různých podmínkách a uspořádáních.

KLÍČOVÁ SLOVA

IQRF, IoT, MESH, Cloud, DPA

ABSTRACT

This thesis is focused on problematic of designing a MESH network with use of IQRF technology. Basic techniques in radio transmission are presented in the introduction part, followed by technologies used in the radio environment. The second chapter presents IQRF, its base parameters and devices which can be used in its network, including cloud. The third part deals with the designing of topology and the methodology of the experimental verification. The last chapter stresses the measurement of parameters of IQRF network in various conditions and arrangements.

KEYWORDS

IQRF, IoT, MESH, Cloud, DPA

VÁŇA, Martin *Návrh rádiové sítě typu MESH pro bez licenční pásmo*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 51 s. Vedoucí práce byl Ing. Radek Fujdiak,

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh rádiové sítě typu MESH pro bez licenční pásmo“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radku Fujdiakovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	10
1 Bezdrátové technologie	11
1.1 Techniky přenosu v rámci bezdrátových technologií	11
1.1.1 Modulace	11
1.1.2 Režimy komunikace v závislosti na obsazenosti kanálu	16
1.1.3 Metody multiplexování a vícenásobného přístupu	17
1.2 Základní topologie sítí	18
1.3 Bezdrátové technologie pro přenos dat	20
2 IQRF	22
2.1 Vlastnosti IQRF	22
2.1.1 Radiové vlastnosti	22
2.1.2 Protokol IQRF – IQMESH	23
2.1.3 DPA - Direct Peripheral Access	24
2.2 Základní prvky IQRF sítě	27
2.2.1 Transceivery	27
2.2.2 Brány	28
2.2.3 Příslušenství	29
2.2.4 Cloudové možnosti pro IQRF	30
2.3 Využití IQRF v praxi	31
3 Návrh měření pro ověření vlastností IQRF sítě	32
3.1 Návrh topologie	32
3.2 Metodologie měření	33
4 Experimentální měření a simulace	35
4.1 Ve vnitřních prostorech (indoor)	35
4.1.1 Šíření signálu ve vnitřních prostorech	35
4.1.2 Standardní odezva ve vnitřních prostorech	37
4.2 Ve vnějších prostorech (outdoor)	39
4.2.1 Maximální možný dosah	39
4.2.2 Šíření signálu v otevřeném a kopcovitém terénu	40
4.2.3 Šíření signálu v zástavbě	41
4.3 Demonstrační měření	42
4.3.1 Náchylnost na zahlcení sítě	42
4.3.2 Konvergence sítě	43
4.3.3 Dlouhodobý sběr teploty	44

5 Závěr	45
Literatura	46
Seznam symbolů, veličin a zkratk	49
Seznam příloh	50
A Obsah přiloženého CD	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Analogové modulace: (a) amplitudová, (b) frekvenční, (c) fázová. . . .	12
1.2	Digitální modulace: (a) ASK, (b) FSK, (c) PSK.	13
1.3	Konstelační diagram QAM modulace	15
1.4	OFDM modulace	15
1.5	Demonstrace obsazenosti kanálu.	16
1.6	Demonstrace TDMA, FDMA, CDMA	18
1.7	Druhy topologií sítí	20
2.1	DPA koncept	25
2.2	DPA příkaz	25
2.3	Programovací přístup	26
2.4	Obecná topologie IQRF	27
2.5	Složení modulu DCTR-72D	28
2.6	Brána s podporou Ethernetu	29
2.7	(a) DK-EVAL-04A, (b) CK-USB-04A	29
3.1	Příklad topologie v RANu.	32
3.2	Příklad logické topologie.	33
4.1	Simulace pro kancelářské prostory při TX 7.	35
4.2	Reálné výsledky pro kancelářské prostory při TX 7.	36
4.3	Standardní průběh odezvy při posílání požadavků na moduly.	38
4.4	Zpoždění při P2P topologii se zapojeným cloudem.	38
4.5	Zpoždění při P2P topologii bez zapojeného cloudu.	39
4.6	Simulace šíření signálu v otevřeném a kopcovitém terénu.	40
4.7	Reálné šíření signálu v otevřeném a kopcovitém terénu.	41
4.8	Simulace šíření signálu v zástavbě.	41
4.9	Reálné šíření signálu v zástavbě.	42
4.10	Průběh odezvy při opakování požadavku s periodou 30 s.	42
4.11	Logická topologie náchylná na výpadek.	44
4.12	Vývoj teploty po dobu 48 hodin.	44

ÚVOD

Technologie se neustále vyvíjí. Dnes je zde další technologická revoluce [6], tou revolucí je svět plně rozšířeného internetu. Díky desítkám let vývoje v této oblasti, se technologie dostala do fáze, kdy člověku dokáže výrazně zjednodušit život, nejenom okamžitým přístupem k informacím, ale nově i se správou domu nebo řízením různých logistických úkonů atd. Jedna z těchto technologií je IQRF. Jedná se o bezdrátové řešení MESH sítě s podporou cloudu a všeho co s tím souvisí. Tato technologie dokáže řídit kvalitu ovzduší v uzavřených místnostech, hlídat stav obsazenosti parkoviště, ovládat lampy pouličního osvětlení, ovládat zemědělské stroje [25] nebo hlídat skladové zásoby. Všechny tyto informace jdou navíc přímo do cloudu, pokud o to uživatel stojí, takže má neustále k dispozici všechny potřebné informace. IQRF byla poprvé představena v roce 2004. Od tohoto roku byla stále zlepšována a upravována, tak aby obstála ve velmi konkurenčním prostředí technologií pro IoT [14]. Dnes se jedná o plně vyvinutou technologii s velkým zázemím a mnoha funkčními nasazeními v praxi. Tato práce je zaměřena na návrh a ověření parametrů IQRF sítě. Budou navrženy měřicí postupy a různé aplikace této technologie v několika prostředích, aby bylo možné ukázat na vhodné možnosti použití a ověřit vhodnost pro již zrealizované projekty.

V první části jsou představeny různé techniky a technologie, nutné pro pochopení funkčnosti IoT a mobilních sítí. Toto představení zahrnuje modulace, multiplexování, typy topologií atd. Poté jsou ukázány různé parametry a vlastnosti sítě IQRF. Zde jsou zahrnuty hlavně radiové parametry a způsob jakým IQRF komunikuje. Dále je práce věnována zařízením různých druhů pro funkci IQRF včetně cloudu. Tato část podrobně rozebírá IQRF modul, díky kterému celá síť funguje. Pak jsou zde také zahrnuty možnosti cloudu a využití brány, na což navazuje návrh topologie. V poslední části se práce věnuje měření různých parametrů pro ověření vhodnosti IQRF pro různá použití. Tato měření jsou prováděna v různých podmínkách a prostředích, aby bylo docíleno, co nejvíce informativních výsledků.

1 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE

1.1 Techniky přenosu v rámci bezdrátových technologií

V bezdrátových technologiích je využíváno mnoho různých technik k dosažení datového přenosu. Zde budou postupně probrány ty nejpodstatnější z nich. Budou představeny různé aspekty jednotlivých technologií, jejich benefity a využití. Probrány budou například modulace, multiplexování atd. Jako první budou představeny modulace.

1.1.1 Modulace

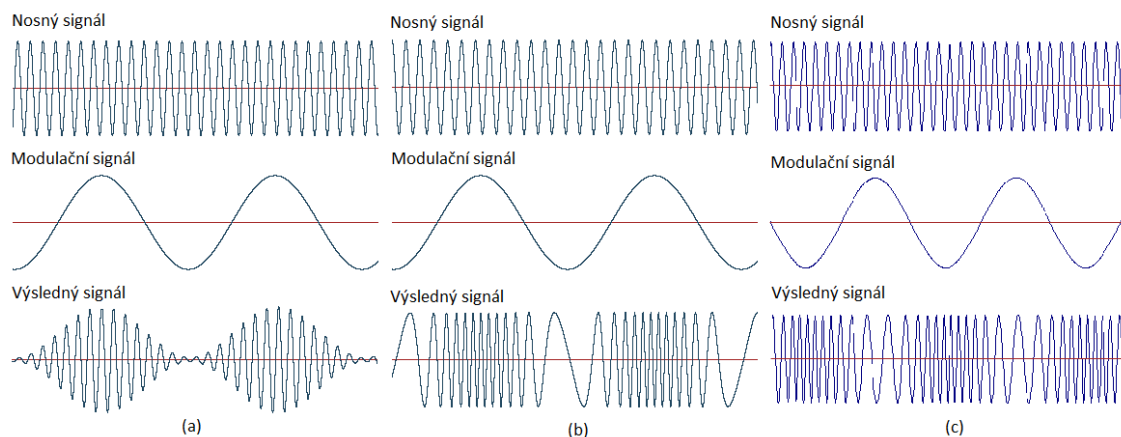
Modulace je proces využíváný v radio-telekomunikačních systémech, ale může být nalezena také ve všech ostatních přenosových médiích, např. metalické vedení, optické vlákno atd. Tato práce se zaměří na využití v radiových systémech. Motivace pro využívání tohoto stále náročnějšího procesu je šetřit co nejvíce frekvenčního spektra. V 90. letech, kdy mobilní komunikace teprve začínali, bylo ve vzduchu "prázdkno". Dnes je tento komunikační kanál využíván mnohem více a zaplňuje se. Z tohoto důvodu bylo a je potřeba vymýšlet stále nové způsoby, jak přes toto médium přenést co nejvíce informací. Modulace je jedním z nejpodstatnějších způsobů jak dosáhnout vyšší spektrální efektivity a tudíž šetřit spektrem. Pokud se začne od základu, tak pro vytvoření modulovaného signálu je vždy potřeba mít modulátor na jedné straně a demodulátor na straně druhé. Tímto nejjednodušším řešením je dosáhnuto jednosměrné, modulované komunikace. Toto řešení se v praxi využívá v pagerech a rádiích. Dnes je téměř v každém zařízení modulátor i demodulátor, tímto se dosahuje obousměrné modulace, která je potřeba pro šetření co nejvíce spektra. Zařízení schopné provést modulaci i demodulaci se nazývá modem. Hlavní princip modulace je ovlivňování některého ze tří parametrů nosného signálu za pomoci modulačního signálu. Tyto tři parametry jsou amplituda, kmitočet a počáteční fáze. Různé techniky modulace využívají jeden z těchto parametrů, případně jejich kombinaci. Hlavní dělení je na digitální a analogové modulace, které budou postupně blíže přiblíženy [15].

Analogové modulace

Analogová modulace se využívá pro modulování analogového signálu, kde modulační i nosný signál je analogový a *spojitý*. Setkáme se s ní například v rádiových nebo v analogových televizních přenosech. Je poměrně jednoduchá na provedení, tudíž i nenákladná. Veškeré analogové modulace vycházejí z tohoto vzorce:

$$y = A \cdot \sin(\Omega t + \phi). \quad (1.1)$$

- **Amplitudová modulace**; Těto modulace se dosahuje měněním amplitudy nosného signálu v závislosti na okamžité hodnotě modulačního signálu. Pro vyjádření velikosti změny tohoto parametru je využíván pojem **hloubka modulace**, udávaná v procentech. Výsledný signál kopíruje tvar modulačního signálu. U této modulace bohužel dochází k zabrání většího frekvenčního pásma, což je jeden z důvodů, proč už se téměř nevyužívá.
- **Frekvenční modulace**; Při této modulaci se mění okamžitá hodnota frekvence nosného signálu v závislosti na okamžité hodnotě modulačního signálu. Maximální změna frekvence nosného signálu odpovídá amplitudě modulačního signálu. Tato změna se nazývá **frekvenční zdvih**. Tato modulace je stále velmi rozšířená. Používá se například v radiích nebo u přenosu zvuku analogového TV vysílání.
- **Fázová modulace**; Tato technika využívá změnu okamžité hodnoty fáze nosného signálu na základě okamžité hodnoty modulačního signálu. Pro vyjádření maximální změny fáze nosné odpovídající amplitudě modulačního signálu je užíván modulační index **h**. V praxi se tato technika moc nepoužívá vzhledem k podobným vlastnostem jako má frekvenční modulace, ale je náročnější na realizaci.

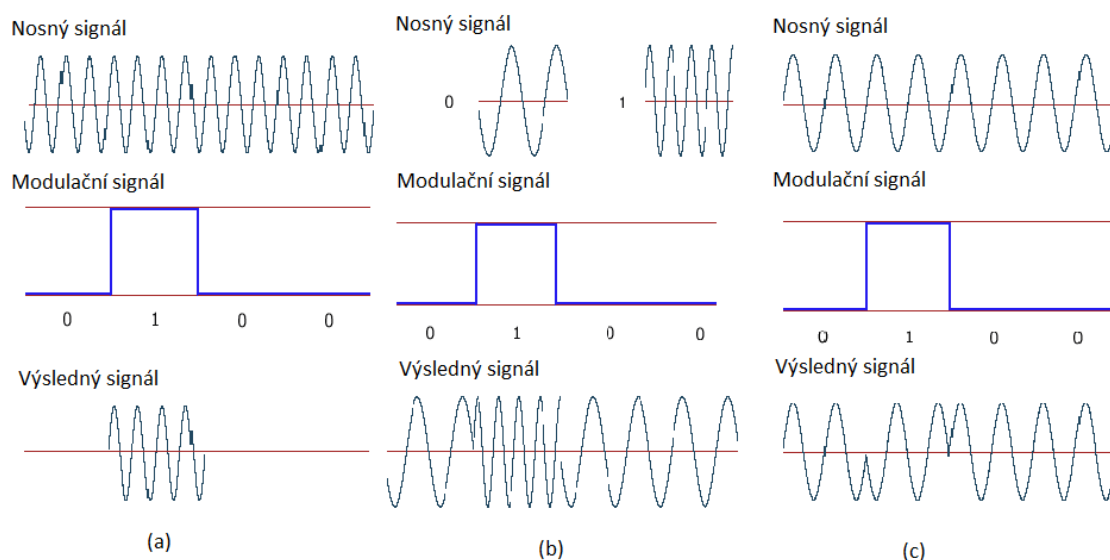


Obr. 1.1: Analogové modulace: (a) amplitudová, (b) frekvenční, (c) fázová [18].

Digitální modulace

O digitální modulaci se jedná tehdy, když je modulačním signálem, digitální signál. Dále platí pravidlo, že pokud signál nabývá konečného počtu stavů, potom i fázor modulovaného signálu má konečný počet poloh. Digitální modulace jsou dnes mnohem více rozšířené než analogové, vzhledem k pronikání digitální techniky do větší a větší části lidských životů. Jedná se o mnohem pokročilejší a účinnější metodu modulace než je analogová, s čímž se také nese větší náročnost na přístroje. Nové způsoby digitální modulace například umožnily větší rychlosti u mobilních technologií. Naneštěstí i tato technika má své limity a ten hlavní je větší chybovost, při větší komplexitě modulace. I tento problém se dá do jisté míry kompenzovat, ale jsou tam jisté limity, jako třeba požadavek na výkon zařízení podílejících se na přenosu modulované informace. Existují 3 základní modulace, které stejně jako analogové ovlivňují jeden ze tří parametrů modulačního signálu. Jedná se o:

- ASK(Amplitude shift keying),
- FSK(Frequency shift keying),
- PSK(Phase shift keying).



Obr. 1.2: Digitální modulace: (a) ASK, (b) FSK, (c) PSK [18].

- **ASK(Amplitude shift keying);** Klíčování amplitudovým posuvem kóduje digitální data pomocí změn velikosti amplitudy nosné vlny. Frekvence a fáze nosné vlny jsou konstantní, což je kritické pro správnou modulaci a demodulaci. Každá amplituda má přiřazenou určitou sekvenci binárních čísel. Zpravidla je tato sekvence stejně dlouhá např. 2 bity. Amplitud, na které se přiřazují tyto sekvence je vždy konečné množství. Modulátor i demodulátor jsou pak navrženy tak, aby využívali stejnou sadu symbolů. Bez této podmínky by nedošlo

ke správné demodulaci. Například signál mohl být zakódován na 1V sada 01, ale demodulátor je nastavený na sadu 10, takže dojde ke špatné interpretaci. Mezi specifika ASK patří citlivost na atmosférický šum, zkreslení a podmínky šíření na telefonní síti. Patří mezi nejjednodušší digitální modulace. Je využívána například v optických vláknech, kde ještě není potřeba šetřit šířkou pásma. V radio-komunikacích již dnes nemá místo a byla vytlačena sofistikovanějšími metodami, kterým bude věnován prostor dále.

- **FSK(Frequency shift keying)**; Klíčování frekvenčním posuvem je další digitální modulační technika. Oproti ASK je stále poměrně využívána. Největší příklad, kde může být nalezena FSK je GSM, která používá její modifikaci GMSK(Gaussian Minimum Shift Keying). Informace se v FSK klíčuje pomocí změn frekvence nosné vlny. Tento základ spojuje všechny derivované techniky FSK. Patří sem například CFSK(continuous-phase frequency-shift keying), GFSK(Gaussian frequency-shift keying), MSK(Minimum-shift keying) a Audio FSK.

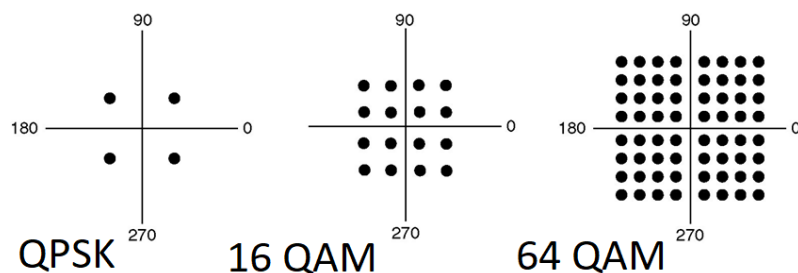
Každá z nich má určitá specifika. Například MSK má velkou spektrální účinnost. GFSK zase na druhou stranu snižuje interference mezi sousedními kanály.

- **PSK(Phase shift keying)**; Klíčování fázovým posuvem je poslední základní digitální modulace. Pro klíčování se využívá posuvů fáze. Každý z těchto posuvů fáze reprezentuje zvolenou hodnotu. Jedná se o jednu z nejpodstatnějších dnes. Je využívána téměř ve všech moderních komunikačních technologiích. Ačkoliv se nejedná přímo o základní PSK, protože ta je již dnes nedostačující, ale o její modifikace. Jedná se například o 4-PSK nebo 8-PSK. 4-PSK je schopná zakódovat 4 sekvence znaků, 8-PSK je schopná zakódovat 8 sekvencí atd. Vždy pomocí změny fázoru a zmenšováním rozdílu mezi jednotlivými fázory je dosaženo lepší spektrální účinnosti, protože je zakódováno více sekvencí bitů. Bohužel i zde platí, že čím náročnější modulace, tím větší chybovost.

Rozšířené metody modulace

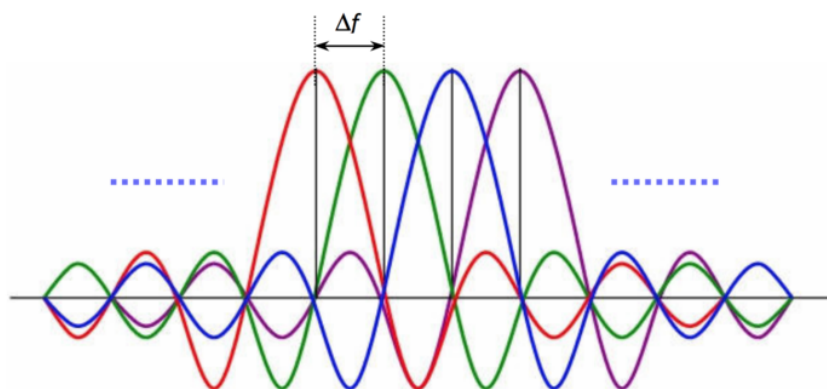
- **QAM(Qadrature amplitude modulation)**; Kvadrurní amplitudová modulace je hybridní modulace, kterou lze považovat za analogovou i digitální, vzhledem k tomu, že je schopná modulovat digitální i analogový signál [15]. Kombinuje vlastnosti dvou modulací. Vždy v závislosti na tom, jaký typ signálu má být modulován (analogová zpráva nebo digitální tok). Pokud se jedná o první jmenovaný, je použita pro zakódování amplitudová modulace v kombinaci s fázovou. Pro druhý jmenovaný se použije klíčování amplitudovým posuvem a fázovým posuvem. Dnes je tato modulace hojně využívána ve všech odvětvích komunikací, díky její schopnosti zakódovat velké množství dat. Jedná

se již o velice komplexní a náročný druh modulace, a proto je velmi náchylná na interference a chybovost kanálu, kterým se šíří. Nejmodernější bezdrátové systémy používají nejvíce 256-QAM, aby nedocházelo k tak velké chybovosti, ale v systémech využívajících kroucenou dvoulinku lze najít až 32768-QAM. K takto velkému rozdílu dochází, protože vzduch není ideální médium a dochází v něm k mnoha druhům rušení. Tuto nevýhodu kabelové médium nemá, tudíž je zde možnost jít hlouběji s danou modulací.



Obr. 1.3: Konstelační diagram QAM modulace [26].

- **OFDM(Orthogonal frequency division multiplex)**; Modulační metoda OFDM spočívá ve využití více (desítky, stovky, tisíce) nosných kmitočtů s rovnoměrným odstupem. Vysílání je rozčleněno do velkého počtu signálů, které nezávisle na sobě přenáší části dat. Nosné kmitočty jsou těsně vedle sebe, aby se maximalizovalo využití dostupného frekvenčního spektra. Subnosné jsou vzájemně ortogonální, takže maximum každé nosné se překrývá s průchody nulou ostatních [17]. Díky velkému rozprostření signálu je OFDM odolná vůči rušení nebo odposlechu.



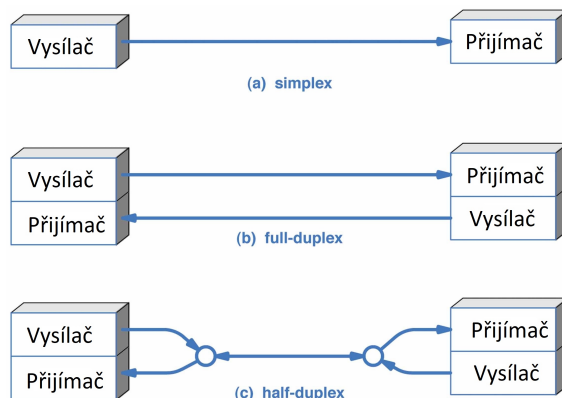
Obr. 1.4: OFDM modulace [10].

1.1.2 Režimy komunikace v závislosti na obsazenosti kanálu

Režimy komunikace v závislosti na obsazenosti kanálu jsou děleny následovně:

- Simplexní,
- Polo-duplexní,
- Plně-duplexní.

Všechny budou následně přiblíženy. Jedná se o způsoby sdílení kanálu. Všechny tři mají různé použití a stupeň vhodnosti pro určité aplikace.



Obr. 1.5: Demonstrace obsazenosti kanálu.

Simplexní komunikace (Simplex)

Jedná se o komunikační kanál, ve kterém se informace posílají pouze jedním směrem. Tato komunikace je využívána např. v pagerech, v hračkách na dálkové ovládání, ve vysílání rozhlasu a televize atd.

Polo-duplexní (Half-duplex)

V tomto typu komunikačního kanálu je umožněna obousměrná komunikace, ale pouze v jednom směru zároveň. Typický příklad jsou vysílačky, kde ukončení vysílání jedné ze stran je značeno obligátním „přepínám“. Vzhledem k této vlastnosti je potřeba pouze jeden komunikační kanál a tím je dosaženo šetření šířky pásma. Pokud není zapotřebí simultánní komunikace, tento režim je plně dostačující pro obousměrnou komunikaci.

Plně-duplexní (Full-duplex)

Nejmodernější režim komunikace, který umožňuje simultánní komunikaci v obou směrech za použití dvou komunikačních kanálů. Příklady použití jsou mobilní telefony nebo pevná linka. Plný duplex se ještě dále může dělit podle toho jakou využívá techniku dělení přenosového kanálu, tzv. emulace plně duplexní komunikace. Dělí se na:

- TDD–Time Division Duplex,
- FDD–Frequency Division Duplex.

1.1.3 Metody multiplexování a vícenásobného přístupu

Multiplexování je proces používaný v telekomunikacích, kde je více analogových či digitálních signálů zkombinováno do jednoho signálu. Multiplexování je aplikováno za účelem co nejefektivněji využít dané přenosové médium. Pro dosažení multiplexování je potřeba multiplexor a demultiplexor, což jsou zařízení, které provádí samotné multiplexování(multiplexor) a zpětný převod na jednotlivé kanály(demultiplexor). V radiových přenosech jsou nejčastěji využívány tyto 3 metody multiplexování:

- Časový multiplex TDM–Time Division Multiplexing,
- Frekvenční multiplex FDM–Frequency Division Multiplexing,
- Kódový multiplex CDM–Code Division Multiplexing.

TDM

Časový multiplex byl vyvinut hlavně pro použití digitálních signálů. Dochází zde k dělení komunikačního kanálu na časové úseky. Každý signál má k dispozici celou šířku pásma, ale pouze na zlomek sekundy. Z této metody vychází metoda vícenásobného přístupu TDMA (Time Division Multiple Access). Tato metoda využívá dělení pásma do časových úseků tzv. Timeslotů. Každý z timeslotů je pak přiřazen uživateli, který sdílí přenosové médium s ostatními. Timesloty mohou být dynamicky měněny, takže při menším zatížení, například v blízké oblasti jsou pouze dva lidé, tak je médium sdíleno pouze mezi 2 uživateli. Tato technika je velmi využívána v 2G sítích (konkrétně GSM).

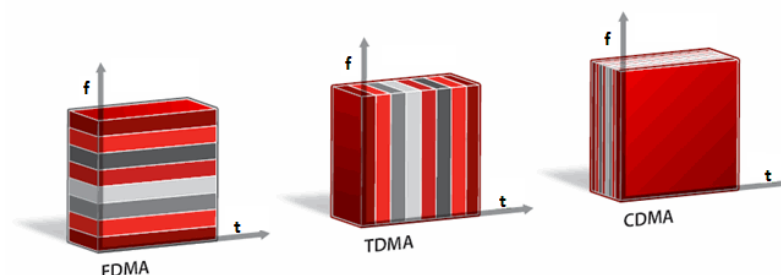
FDM

Frekvenční multiplex na rozdíl od TDM nedělí čas, ale přidělené frekvenční spektrum mezi jednotlivé signály. Tímto přístupem je dosaženo permanentního připojení, ale signál nemá k dispozici celou šířku pásma. Nevýhoda tohoto multiplexování je, že je potřeba vkládat mezi jednotlivé signály tzv. ochranná pásma pro zamezení interferencí. Je jí ale možné využívat, jak pro analogový, tak pro digitální signál.

Z této metodiky vychází FDMA (Frequency Division Multiple Access), kde je každá subfrekvence přidělena jednotlivým uživatelům. Opět je zde možnost dynamicky přidělovat subfrekvence a dosahovat tím lepších vlastností připojení při málem vytížení. Odpadá zde nutnost vysoké časové reže oproti TDMA, ale mohou se zde vyskytovat přeslechy, které naruší přenos. Tato technika je hlavně využívána u satelitních přenosů.

CDM

Kódový multiplex je poslední ze základních metodik multiplexování. Využívá pseudonáhodný kód pro dělení přiděleného spektra mezi jednotlivé kanály. CDMA (Code Division Multiple Access) je odvozená metodika vícenásobného přístupu. Používá se zde technika rozprostírání spektra, což samo o sobě zajišťuje jistou bezpečnost účastníkům komunikace. Toto rozptření je docíleno pseudonáhodným kódem. Každý uživatel má pak přiřazený svůj pseudonáhodný kód pomocí, kterého rozkóduje a zakóduje svoji komunikaci. Pro rozptřování jsou zde nejčastěji použity Walshovy funkce¹. CDMA je velmi využíváno v třetí generaci mobilních sítí. Jedna z 3G sítí přímo vychází z CDMA.



Obr. 1.6: Demonstrace TDMA, FDMA, CDMA [1].

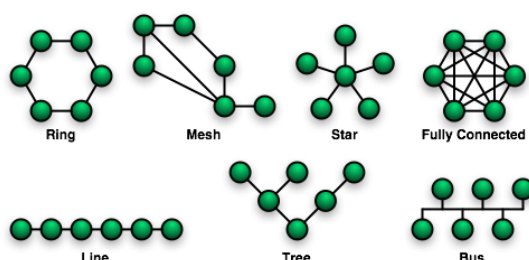
1.2 Základní topologie sítí

Síťová topologie je druh popisu, jak jsou jednotlivé prvky v síti propojeny. Topologie se dělí na dva hlavní druhy, fyzickou a logickou. Fyzická se zabývá umístěním jednotlivých prvků sítě, včetně kabeláže. Naproti tomu logická se zaměřuje na způsoby toků dat v síti nehlédě na umístění, či propojení síťových prvků. Existuje osm základních druhů topologií [7]. Všechny budou krátce představeny. MESH topologii bude věnován větší prostor, protože jsou základním kamenem IQRF technologie.

¹Tyto funkce slouží k rozptřování spektra v CDMA a zajištění ortogonální posloupnosti.

- Point-To-Point (Bod-Bod) – Nejelementárnější topologie, kde figurují pouze dva koncové síťové prvky a spojení mezi nimi. Výhodou je nepřerušovaná komunikace, bohužel za cenu plýtvání prostředků, právě kvůli agregaci celé linky pouze pro 2 koncové body. Pokud je linka přerušena, tak i komunikace ustane.
- Bus (Sběrníková) – Mírně komplexnější topologie, než P2P, ale stále velmi podobná. Koncové zařízení jsou napojené na jednu společnou sběrnici (kabel), kterou sdílí pro přenos dat. V minulosti využívána, dnes již zastaralý přístup k připojení více uživatelů do jedné sítě. Výhodou je jednoduchá implementace, velkou nevýhodou je sdílené médium (kabel). V případě poruchy daného média celá síť přestává fungovat.
- Star (Hvězdicová) – Jedna z nejvíce standardních topologií. Každé z koncových síťových zařízení je připojeno na centrální uzel (zde většinou figuruje, jako centrální uzel, směrovač nebo přepínač). Centrální uzel přeposílá zprávy určeným koncovým uživatelům. Tato topologie je velmi odolná proti selhání, pokud jeden z koncových uzlů selže komunikace probíhá dále mezi zbývajícými. Jednoduché přidávání a odebrání koncových uzlů. Nevýhoda je vytvoření jediného bodu selhání. Pokud centrální uzel selže, komunikace ustane na všech uzlech, proto je většinou snaha o co nejmenší možnost selhání (pořízení odolnějších zařízení, přidání zařízení navíc, atd.).
- Ring (Kruhová) – Kruhová topologie je jedna z jednodušších topologií, protože se skládá z vícero P2P spojení, které tvoří uzavřenou smyčku. Dnes se již nevyskytuje, v minulosti byla používána pro úsporu prostředků, protože každý počítač potřeboval pouze jeden vysílač a přijímač. Mezi výhody patří jednoduchý přenos dat, protože se data šíří pouze jedním směrem, dále nevznikají kolize a je zde minimalizováno zpoždění. Pokud ale dojde k přerušení jednoho ze spojení, tak celá topologie přestává fungovat.
- Tree (Stromová) – Tato topologie se často vyskytuje ve větších sítích. Jedná se o hierarchickou topologii, kde nejvýše je směrovač a ten posílá data dalším směrovačům, na které jsou napojeny koncové uzly. Výhodou je vysoká redundance sítě. Bohužel toto řešení je velmi nákladné. Prakticky jde o zřetězenou hvězdicovou topologii.
- MESH – Tento typ topologie získal pozornost v posledních letech, hlavně díky IoT segmentu, kde má tato topologie velké zastoupení. Využívání vícero spojení k různým uzlům umožňuje vysokou redundanci, což je žádoucí pro rozsáhlé topologie objevující se v IoT. Zajímavý společný prvek všech MESH topologií je absence centrálního prvku, což odstraňuje problematiku centrálního bodu selhání, díky této vlastnosti jsou MESH sítě ještě více odolné proti výpadku. Je zde také kladen důraz na vysokou rozšiřitelnost. Bohužel s těmito vlastnosti se nesou vysoké požadavky na směrování. V praxi umí každý uzel zapojený

do MESH topologie směřovat, což sebou nese velkou výzvu v oblasti programování. MESH topologie má dva poddruhy. První je plně propojená (Fully Connected viz 1.7) MESH topologie, což znamená, že každý prvek je propojený s každým. Z tohoto typu je patrná až neúměrně velká redundance. Prakticky nemůže dojít k přerušení spojení, protože se vždy najde spojení, které doručí požadovaný paket. Druhá se jmenuje smíšená MESH topologie. Jedná se o úpravu plně propojené MESH sítě. Hlavní rozdíl je, že ne každý prvek je propojený s každým. Zmenšuje se zde redundance, ale realizace je podstatně jednodušší.



Obr. 1.7: Druhy topologií sítí [23].

1.3 Bezdrátové technologie pro přenos dat

Bezdrátové technologie zažívají boom. Hlavně díky rozvíjejícímu trhu s IoT řešeními, začínají být dostupné různé nové technologie pro přenos informací. Níže jsou vyčteny některé z nich, z pohledu jejich zaměření na IoT a jejich krátký popis.

Technologie mobilních sítí 2G+

Od 80. let se mobilní sítě rapidně vyvíjely. Dnes je aktuální čtvrtá generace, která podporuje přenos hlasu ve vysoké kvalitě a přenos dat v rychlostech až 150 Mb/s v upstreamu a 50 Mb/s v downstreamu. Vzhledem k jejich zaměření hlavně na přenos hlasu a dat se dodnes nepočítalo s těmito technologiemi pro využití v IoT segmentu. Tento přístup se začíná měnit a v některých zemích se začíná testovat 5. generace mobilních sítí, která umožňuje využití právě v IoT oblasti ve velkém rozsahu.

Bluetooth smart

Bluetooth je známý standard už od roku 1994 obstarávající bezdrátovou komunikaci. Bluetooth Smart je jeho modifikace pro užití právě v IoT. Přezdívá se mu také Bluetooth Low Energy nebo-li Bluetooth LE. Poprvé bylo uvedeno v roce 2006

a dnes je součástí standardu Bluetooth v4.0, což znamená, že je již přítomno v hodně zařízeních. Je vhodné pro různé aplikace, jako například sport a zdravotnictví.

NarrowBand IoT

NarrowBand je technologie zaměřená čistě na IoT a realizaci pod mobilními sítěmi 4. generace. Je standardizována 3GPP a její poslední verze byla vydána v roce 2016. Jedná se tedy o novější technologii. Je vhodná pro všechny druhy zařízení spadající do IoT. NarrowBand má širokou podporu u všech velkých operátorů a technologických firem.

Sigfox

Sigfox je také zaměřena hlavně na IoT. Využívá celulární architektury, ale ne té, kterou vlastní operátoři, ale tvoří si vlastní síť. Dnes má již docela široké pokrytí ve Francii a Španělsku. Plánuje se rozrůst do dalších 50 zemí. Vhodných využití je opět mnoho, například inteligentní budovy, spotřební elektronika a další.

WiFi HaLow

WiFi HaLow je konkurenční technologií k Bluetooth LE. Také vychází z poměrně dlouho známého standardu 802.11. Přesněji řečeno vychází z jeho nejnovější modifikace 802.11ah. Od klasické 802.11 se hlavně liší použitím sub-GHz pásma a přenos probíhá dávkovaně. WiFi HaLow bude teprve specifikován, takže nejsou známy přesné parametry.

ZigBee

ZigBee také vychází ze standardu 802.15.4. Je stejně stará, jako IQRf, tedy z roku 2004. ZigBee není zaměřena na velké pokrytí, ale spíše na malé sítě. Díky směřování mezi jednotlivými uzly je schopná radius svého dosahu zvětšovat. Má podporu velkých firem z různých oborů, ale hlavně z oboru automatizace. Zaměřuje se na obecné použití, takže spotřební elektronika, ale například i průmyslová automatizace.

IQRf

IQRf je další ze zástupců technologií primárně určených pro IoT. Bylo vyvinuto v České republice v roce 2004 a od té doby je neustále aktualizováno a doplňováno o novou funkcionalitu. Jedná se o kompletně proprietární řešení a nevyužívá žádný ze standardů IEEE. Operuje sub-GHz pásmu na frekvencích 868 a 433 MHz, což technologii propůjčuje velký dosah a malou energetickou náročnost spjaté s nízkou frekvencí. Tato práce se nadále věnuje pouze IQRf technologii.

2 IQRF

IQRF je kompletní řešení pro bezdrátovou komunikaci. Platforma je navržena pro nízko-rychlostní, nízkoenergetický a nízko-objemový datový přenos. Společnost vyvíjející IQRF nebo-li MicroRisc je česká společnost, založená v roce 1991 a základy IQRF položili v roce 2004. Od té doby je technologie stále vyvíjena a zdokonaľována. V současné době drží 36 patentů a rozrůstá se po celém světě. Navazuje vztahy s největšími firmami na poli IT, například Microsoft, IBM a Intel. V Česku úzce spolupracuje s O2 a Škoda auto. V roce 2014 vyhrála cenu Česká hlava za nej-inovativnější technologii. Za vznikem IQRF bylo několik myšlenek, které řídili jeho vývoj. První a hlavní myšlenka byla navrhnout protokol, který by byl nenáročný, ale dobře zaměřený na určitou věc. Další podstatná věc byla, navrhnout protokol chytře, tak aby zvládal dobře propojit nezávislé sítě a zároveň měl přehlednou architekturu, díky čemuž by bylo dosaženo menšího provozu v síti. A poslední hlavní myšlenka za IQRF je, aby byl přístupný, ale zároveň dobře modifikovatelný pro potřeby zákazníka.

2.1 Vlastnosti IQRF

2.1.1 Radiové vlastnosti

Technologie operuje v sub-gigahertzovém ISM pásmu. Využívá tudíž tyto tři frekvence 868 MHz, 916 MHz, 433 MHz. Maximální podporovaná rychlost je 19,836 kb/s, z čehož je vidět, že síť je opravdu určena pouze pro přenášení malých datových objemů. Výstupní hodnota síly signálu je až 12,5 mW. Dosah této technologie se pohybuje od desítky metrů v uzavřených prostorech až po jednotky kilometrů v otevřených, za použití pouze malých antén. Pokud by byly použity antény s vyšším výkonem, tak by bylo dosaženo, ještě lepších výsledků. Technologie je paketově orientovaná. Jeden paket může nést až 64 B dat. Což je pro účely této technologie plně dostačující.

Při využití extrémně úsporného režimu IQRF modulu je využíváno pouze 15 μA , když je v aktivním stavu a 1 μA ve spánkovém režimu. Díky takto malým hodnotám a poměrně velikému akumulátoru (akumulátor IQRF je obsažen v vývojářském kitu a má kapacitu 400 mAh) jsou schopny moduly být v aktivním stavu po velmi dlouhou dobu. Bohužel při využití tohoto módu je vypnuta valná většina funkcí a schopnosti modulu jsou tak ořezány na minimum. Mnohem běžnější je využití normálního režimu, který odebírá v aktivním stavu maximálně 12,5 mA a při spánku je hodnota stejná, jako u nízkoenergetického módu. Dále je zde možnost použití ještě jednoho

úsporného módu, který odebírá v aktivní režimu $233\ \mu\text{A}$. Pro přehlednost jsou hodnoty vyneseny níže. Veškeré předchozí hodnoty platí pro modul v přijímacím módu. Pokud modul vysílá jsou hodnoty v rozsahu $8,3\text{ mA}$ - 19 mA , v závislosti na zvoleném výkonu integrované antény. Odběr modulu TR-72D v různých režimech:

- Režim spánku: $<1\ \mu\text{A}$ (pokud jsou všechny periferie ve vypnutém stavu, včetně antény).
- Režimy rádia:
 - ve spánku: $1,6\text{ mA}$,
 - v připraveném módu: $3,0\text{ mA}$.
- Při přijímání dat:
 - standardní režimu: $12,5\text{ mA}$,
 - úsporný režim: $233\ \mu\text{A}$,
 - velmi úsporný režim: $15\ \mu\text{A}$.
- Při vysílání dat: $8,3\text{ mA}$ - 19 mA (podle zvoleného výkonu).

Díky výše zmíněným parametrům je patrné, že technologie je dobře přizpůsobitelná jakýmkoli požadavkům zákazníka. Při nastavování radiového modulu může být zvolena senzitivita na příchozí signál, také je zde možnost kontrolovat sílu příchozího signálu.

IQRF podporuje dva radiové režimy:

1. Sítový - Při síťovém režimu je v topologii vždy alespoň jeden koordinátor, který řídí až 239 dalších síťových prvků. Posílané pakety jsou přístupny pouze adresovaným prvkům v dané síti. V tomto režimu jsou přístupné komplexní MESH sítě s automatickým směrováním. Dále je zde podporována plná funkčnost DPA (Direct Peripheral Access), kterému bude věnováno místo níže.
2. Nesítový - Jednodušší režim komunikace mezi síťovými prvky. Propojuje dvě či více P2P (Peer-To-Peer) zařízení. Pakety jsou zpřístupněny všem dostupným zařízením v okolí. Síťové funkce jsou minimální, např. směrování je vypnuto. Dostupné je pouze jednoduché adresování.

Tímto je sekce o Radiových vlastnostech IQRF uzavřena. Další sekce se bude věnovat IQMESH topologii.

2.1.2 Protokol IQRF – IQMESH

IQMESH je protokol sítě vycházející z topologie typu MESH, jenž je popsána v předchozím textu. Zde je prostor věnovaný pouze vlastnostem IQMESH. IQMESH je implementovaný do IQRF operačního systému. Vzhledem ke komplexnosti sítí typu MESH je, i přesto tento protokol schopen nabídnout rychlou a jednoduchou implementaci.

Protokol podporuje až 240 zařízení v jedné síti. Jedná se o proprietární protokol IQRf. Podporuje až 240 směrovacích kroků na paket v reálném čase. Při využití DPA je schopen překonat 33 směrovacích kroků pod jednu sekundu. Každý transceiver v topologii je schopen jednat, jako koordinátor i jako normální uzel. Každý z uzlů je schopen směrovat pakety v pozadí. Každé zařízení v IQRf technologii je schopno pracovat ve dvou nezávislých sítích zároveň. Díky této vlastnosti, má IQRf možnost, mít neomezený počet zařízení v topologii. Využívá tzv. řetězení sítí, což je patentovaná technologie v rámci IQRf. Je zde možnost si vybrat více směrovacích algoritmů spadající pod MESH topologii, tzn. úplná MESH, neúplná MESH, optimalizovaná MESH, atd. IQMESH podporuje dynamické časování, což znamená, že může být zvolen počet směrovacích kroků či timeslotů.

FRC nebo-li Fast Response Command je opět proprietární řešení od IQRf aliance. Jedná se o metodu, jak co nejrychleji poslat příkaz koordinátoru do všech zvolených uzlů a zároveň od zadaných uzlů obdržet odpověď včetně nasbíraných dat.

IQMESH podporuje Discovery neboli nalezení směrovacích cest automaticky v reálném čase a AutonetWORK, jenž umožňuje automatické vybudování sítě.

2.1.3 DPA - Direct Peripheral Access

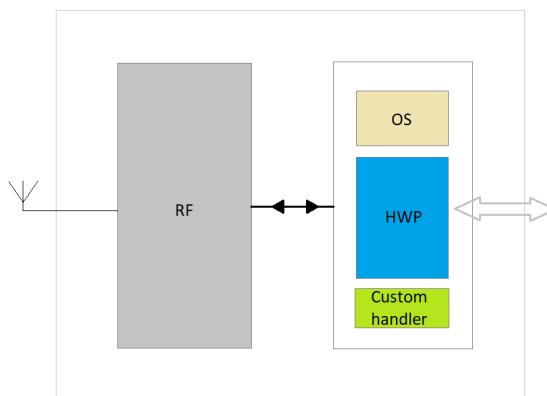
DPA je jednoduchý, bajtově orientovaný protokol používaný pro řízení periférií a služeb poskytovaných IQMESH síťovými prvky přes SPI nebo UART rozhraní [2]. Architektura IQRf se skládá ze třech částí:

1. Operační systém – Základ každého MCU¹. Funguje na nejnižší vrstvě a obstarává elementární funkčnost modulu např. napájení.
2. DPA vrstva – Je obsažena přímo v hardwarovém profilu (HWP), který je nainstalovaný již z továrního nastavení. Tento hardwarový profil je pak ovládan DPA protokolem. Pro základní uživatelskou funkcionalitu plně dostačuje předinstalovaný hardwarový profil. Díky této vlastnosti uživatel nemusí umět programovat, protože mu stačí předinstalované profily.
3. Custom DPA handler – Jedná se o nadstavbu hardwarového profilu, což ho řadí do třetí vrstvy. V případě, že uživatel shledá dostupné profily nedostačující, je mu poskytnuta možnost si doprogramovat svoji speciální nadstavbu tzv. Custom DPA handler. Tento ovladač je psán většinou v jazyce C a poskytuje rozšířené možnosti uživateli.

Toto uspořádání je jedinečné a patentované IQRf aliancí. Příklad konceptu IQRf architektury je na Obr. 2.1. Na něm je patrné, že všechny tři vrstvy jsou přítomny

¹MCU znamená Microcontroller unit, což je jednoduchý integrovaný obvod, který obsahuje procesor, paměť a programovatelné vstup/výstup periférie.

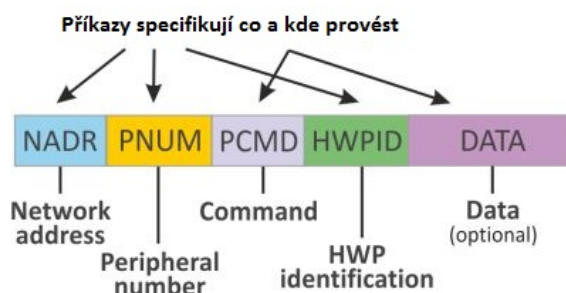
na MCU, které dále komunikuje s radiovým prostředím. Díky této architektuře je nesmírně jednoduché implementovat IQRF do jakéhokoli využití, bez znalosti programování, ale zároveň poskytuje možnost si přizpůsobit funkčnost na míru přes Custom DPA handler.



Obr. 2.1: DPA koncept [24].

Transceiver podporující tuto architekturu se jmenuje DCTR, což znamená Data Controlled Transceiver. DCTR podporuje plně HWP s DPA, které jsou nezbytné pro funkčnost architektury. DCTR budou blíže rozebrány v následující kapitole.

Níže se nachází obecná struktura DPA rámce Obr. 2.2. Díky této jednoduché struktuře, je pak ovládání jednotlivých prvků jednodušší a málo datově náročné, což je potřeba pro využití v IoT.



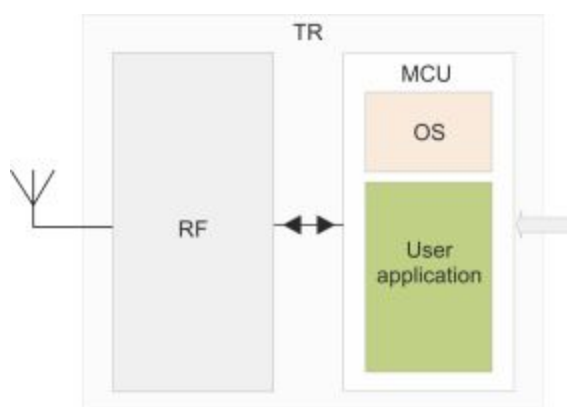
Obr. 2.2: DPA příkaz [2].

- NADR – Síťová adresa, která určuje na jaký prvek má být příkaz vyslán. Může nabývat více hodnot. Podporuje Broadcastové vysílání, směrování na jednotlivé uzly (až 239 + jeden koordinátor) a na lokální zařízení (přes IDE). Má k dispozici 2 bajty, ale 2-bajtové adresování není podporováno.

- PNUM – Tzv. peripheral number nebo-li identifikační číslo periferie, které udává na jakou periferii bude příkaz vyslán. Například PNUM 00 je koordinátor nebo PNUM 0A je teploměr. Každá periferie pod IQRF aliancí má svoje identifikační číslo. PNUM má k dispozici jeden bajt.
- PCMD – Příkaz, který má být na danou periferii vyslán. Každá periferie má svou řadu příkazů. PCMD má také k dispozici 1 bajt.
- HWPID – Jedinečné identifikační číslo, přiřazené každému novému výrobku pod IQRF aliancí. Specifikuje funkčnost, podporované periferie a jeho chování. Funguje jako kontrola pro HWP. Příkaz se provede pouze pokud se HWPID shoduje, jak v příkazu samém, tak v zařízení. HWPID má k dispozici 2 bajty.
- DATA – Dobrovolné políčko pro jakékoli data. V tomto políčko je možné využít až 60 bajtů.

Z výše zmíněného lze vyvodit, že v IQRF jsou dva přístupy k tvoření aplikací. Jeden je pod DPA, druhý přímo pod operačním systémem. DPA přístup byl přiblížen výše. Využívá HWP místo kódu napsaného uživatelem, tudíž nevyžaduje téměř žádné programátorské znalosti. Pokud chce uživatel ovlivňovat HWP, tak má možnost, ale je zde již vyžadována jistá znalost programovacího jazyka C. Pro většinu sítí je tento přístup dostatečný. Pokud není uživatel spokojen s HWP a nestačí mu prostor vyhrazený pro Custom DPA handler, má možnost si napsat profil vlastní, přímo pod operačním systémem.

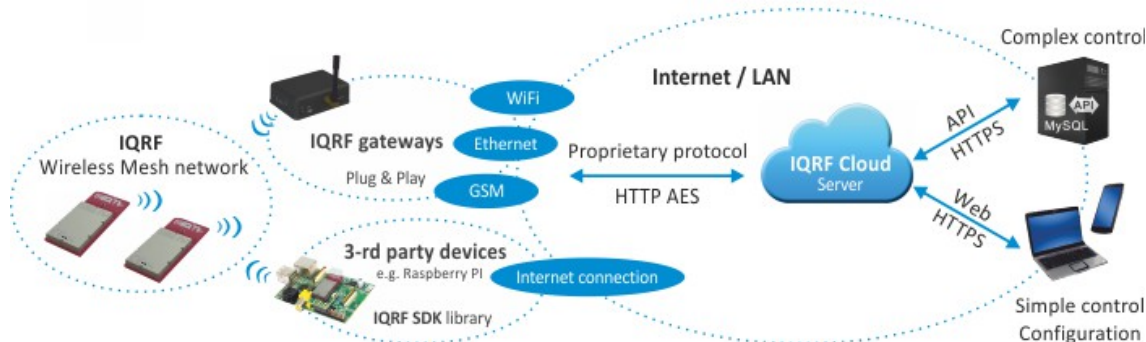
Tento přístup klade vysoké nároky na znalost funkcionality IQRF architektury a programování. Na druhou stranu, programování vlastní aplikace přímo pod operačním systémem zajišťuje plnou přizpůsobitelnost požadavkům uživatele. Není obecná a je přizpůsobená na míru. Plus uživatel má mnohem větší prostor pro svoji aplikaci viz 2.3.



Obr. 2.3: Programovací přístup [24].

2.2 Základní prvky IQRF sítě

Topologie IQRF se skládá ze 4 základních prvků. První jsou DCTR moduly, které tvoří základ topologie. Ty jsou dále připojeny k bráně. Brána může být propojena s cloudem a na cloud přistupuje uživatel pomocí svého koncového zařízení. Příklad, jak může taková IQRF topologie vypadat je Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Obecná topologie IQRF [11].

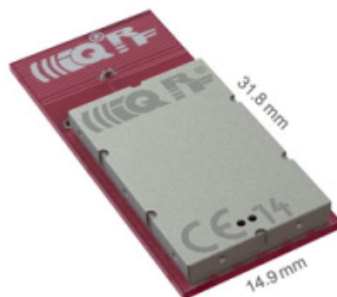
Jak je patrné z obrázku, v IQRF síti je možnost využívat komponenty třetích stran, jako je například RaspberryPI či Arduino². Tyto zařízení lze použít jako bránu a poskytují více možností kontroly, jak přistupovat na web, či k samotným modulům. Další možnost, jak ovlivnit topologii je výběr cloudu, jemuž bude věnován prostor dále.

Prvky, jenž se tvoří radiovou část prostředí jsou konfigurovány skrze IQRF IDE. Toto IDE bylo vytvořeno IQRF aliancí a obsahuje všechny potřebné nástroje pro tvorbu IQRF projektu. Je zde obsaženo vše pro tvorbu aplikací. Poskytuje přehledně všechny informace o zapojených zařízeních a o celé topologii. Dále jsou přítomny různé nastavovací nástroje a terminály pro zasílání a přijímání DPA příkazů. V IDE je obsažen i IQMESH síťový manažer, díky kterému je nastavení a otestování topologie podstatně jednodušší, ukazuje logickou topologii, umožňuje dynamicky adresovat jednotlivé síťové uzly atd. IQRF IDE je komplexní nástroj pro tvorbu jakékoli aplikace při využití IQRF. Podporuje všechny oficiální transceivery a brány, takže by zde neměl být problém s kompatibilitou ani u starších zařízeních.

2.2.1 Transceivery

Transceivery jsou základním kamenem IQRF sítě. Vzhledem ke stáří technologie prodělali největší vývoj. Současná nejnovější verze je TR-72. V této práci bude použit typ TR-72DAT. Tento konkrétní model obsahuje integrovanou anténu a splňuje

²Jedná se o zmenšeniny klasických počítačů, nedosahují takových výkonů, ale pro použití v IQRF jsou více než dostačující.



Obr. 2.5: Složení modulu DCTR-72D [3].

všechny parametry nastavené IQRF. Podporuje SIM připojení. Má k dispozici 12 I/O pinů. Funguje ve vyznačených pásmech pro IQRF tedy 916 MHz a 868 MHz, ačkoli frekvence 916 MHz čeká teprve na implementaci. Podporuje všechny úsporné módy. Jeho typický dosah se pohybuje v řádech stovek metrů. Na tomto DCTR je integrován teploměr, 2 LED a přídatná paměť. Modul je na Obr. 2.5. Na obrázku je patrné i stínění modulu, což zjednodušuje interoperabilitu a certifikaci koncových zařízení. Oproti předchozí generaci TR-52D, používá modul jinou modulaci. Je zde použita GMSK místo FSK. Dále zde byl podstatně zvýšen výkon antény na 12,5 mW a tudíž dosah se zvedl ze 300 m na 500 m. Bylo zde dosaženo většího bitratu a objevila se zde podpora uživatelské aktualizace operačního systému.

2.2.2 Brány

Brány v IQRF plní funkci sběrače dat a prostředníka. Všechny data co moduly v síti nasbírají se posílají na bránu, kde jsou uloženy a následně poslány do cloudu, pokud je k dispozici. V současné době existují 4 typy bran, každá z nich podporuje jinou formu komunikace mezi IQRF sítí a internetem:

- Ethernet GW,
- GSM GW,
- WiFi GW,
- USB GW.

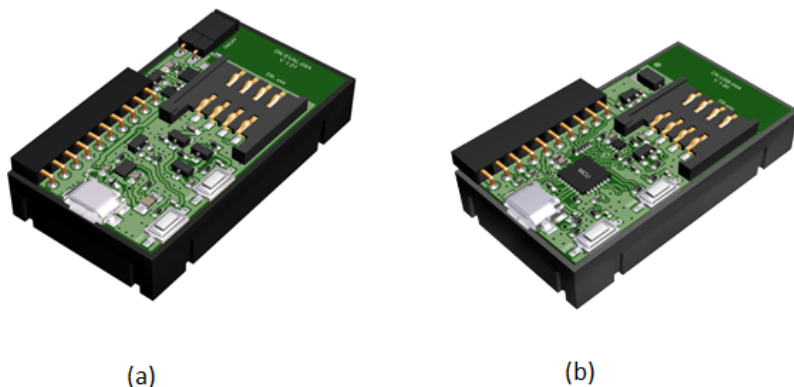
Ethernetová a WiFi GW potřebují přímé připojení k internetu. GSM brána využívá mobilních sítí pro připojení k internetu. Všechny GW poskytují stejnou funkcionalitu až na USB GW, která pouze emuluje funkčnost pravé brány. Všechny mají podporu IQRF cloudu. V této práci se bude pracovat s následující bránou Obr. 2.6, která podporuje technologii Ethernet. Jedná se o model GW-ETH-02A. Dále je zde dostupný interní www server, který umožňuje konfiguraci přes webové rozhraní. Plně podporuje DPA i IQRF IDE, pro jednoduchou konfiguraci. Cena jedné brány činí 89 €.



Obr. 2.6: Brána s podporou Ethernetu [8].

2.2.3 Příslušenství

Za desetiletou existenci IQRF se vyskytlo spousta doplňků, příslušenství a koncových prvků, které tuto technologii využívají. Pak je také nezbytné mít vývojářské nástroje, které prodělaly vývoj v průběhu let. Z vývojářských zařízení jsou 2 nejpodstatnější. Jedná se o univerzální vývojový kit pro DCTR moduly a IQRF programovací a debugovací kit.



Obr. 2.7: (a) DK-EVAL-04A, (b) CK-USB-04A [4].

Na první pohled není viditelný téměř žádný rozdíl, ale debugovací kit nemá integrovanou baterii, takže napájení je řešeno externě přes USB. USB konektor u DK kitu se využívá pro nabíjení interní LiPol akumulátor o kapacitě 400 mAh. Tato kapacita dostačuje pro dlouhodobou výdrž a funkčnost DCTR modulu, který napájí. Pouze debugovací a programovací kit umožňuje nahrávat uživatelský kód do DCTR modulů a pouze u CK kitu je možnost testovat uživatelské aplikace. Oba kity využívají SIM formát pro DCTR moduly a podporují valnou většinu dostupných DCTR modulů.

Příslušenství k IQRF modulům se skládá hlavně z náhradních a vyměnitelných dílů. Dostupné jsou antény s různými parametry, pak náhradní konektory a kabely

pro připojení modulů k anténám nebo k PC. Koncových zařízeních je nesmírně mnoho od různých výrobců. Jsou dostupné různé senzory a ovladače, pro vytvoření opravdu komplexní užité sítě.

2.2.4 Cloudové možnosti pro IQRF

Cloud je středobodem každé IoT platformy a IQRF není výjimkou. Je zde kladen důraz na co největší spolehlivost a přehlednost. Cloud v první řadě sbírá všechny data, které mu jednotlivé GW pošlou, dále je musí zpracovat a poté zanalyzovat. Poté je zde prostor pro největší výhodu cloudu. Uživatel je schopen kontrolovat všechny své IQRF zařízení na dálku právě přes cloud. Stačí se pouze přihlásit a může začít posílat příkazy s prakticky okamžitou zpětnou vazbou. IQRF může využívat jakýkoli cloud, pokud jsou na něm nainstalovány potřebné aplikace. V rámci IQRF aliance se nachází více cloudů.

CIS cloud (IQRF cloud)

Tento cloud je „výchozí“ cloud pro všechny IQRF zařízení. Jeho největší benefit je dostupnost, protože je zdarma. Funkcionalita je zde ořezána na nezbytné, ale postačující minimum. Nabízí zaregistrovat více zařízení a registrace je velmi uživatelsky přívětivá a rychlá. Podporuje tvorbu maker nebo skriptů pro exportování nasbíraných hodnot, případně cyklické zadávání příkazů atd. Podporuje webové rozhraní zabezpečené AES128, takže uživatelská data nemohou být jednoduše zneužita. Tento cloud bude využit při pozdějším měření vzhledem k jeho dostupnosti, jednoduchosti a ceně.

Microsoft Azure

Microsoft Azure je komplexní, komerční řešení pro rozsáhlé sítě. Nabízí vysokou modulárnost služeb a vysokou přehlednost. Azure je postavený pro milióny připojených zařízení najednou. Celá platforma Azure je navržena pro co nejjednodušší kontrolu zařízení a vyhodnocování zpětných dat. Figuruje od samotného GW až po vizualizaci dat. Na GW je nainstalován například Windows 10 IoT core edice, což je velmi odlehčený Windows 10, ten funguje, jako sběrný bod informací, které dále putují do Azure IoT hub, kde jsou data zpracovávána. Následně jsou vyvedena do přehledných tabulek a grafů v PowerBI. To vše v příjemném a známém prostředí Windows 10. Výhoda tohoto řešení je schopnost aktualizovat zařízení na dálku, čímž je dosaženo minimální potřeby zasahovat do topologie a ke zvýšení bezpečnosti. Bohužel toto řešení je velmi nákladné a hodí se pro firemní sféru. Microsoft Azure představuje zástupce komerčního cloudu. V rámci IQRF je mnoho možností cloudu, ale všechny

mají podobné funkce. Azure má výhodu v komplexní platformě, která sahá od GW po cloud, což žádný jiný poskytovatel cloudu nemůže nabídnout.

2.3 Využití IQRF v praxi

Za deset let existence vzniklo mnoho projektů využívajících IQRF. IQRF je vhodné spíše pro průmyslové nasazení, jak bude evidentní i v příkladech využití. Hlavní problém, který zde vzniká je praktická nemožnost manipulování se zařízením, pokud bylo už jednou usazeno a adresováno do GW nebo koordinátoru. Při změně pozice TR modulu bývá, ve valné většině případů, topologie kompromitována a přestává správně fungovat. Proto se toto řešení hodí hlavně pro statická nasazení. Hlavní využití je v automatizačních řešení, například pouliční osvětlení.

Vhodné použití IQRF je pouliční osvětlení, protože je statické a vhodný kandidát na automatizaci. Pokud světelný senzor vyhodnotí, že je již vysoká míra šera, tak tuto informaci zašle na Cloud. Cloud odpoví příkazem, rozsvítit světlo a uloží data pro statistiku [20].

Další možné využití je ventilace a kontrola vzduchu. Tímto segmentem se v České republice zabývá firma Protronix, která poskytuje celkové řešení pro ventilaci budov. V každé místnosti je připojen senzor, zapojený do IQRF sítě. Senzor měří obsah CO₂ ve vzduchu a posílá data na cloud. Na cloudu jsou data vyhodnocována a na základě CO₂ obsahu, pak cloud automaticky (na základě určitých parametrů) ovládá ventilaci [21].

Zajímavé využití IQRF je také chytré parkování, kde senzor poskytuje data o volném či obsazeném místě a posílá je v reálném čase na informační tabule, takže člověk ví kde má zaparkovat [19].

V poslední době byl také nárůst v nasazování podobných technologií do monitorování směsného odpadu. Čidlo kontroluje stav odpadního zařízení a pokud dosahuje tato hodnota určité míry pošle pro svoz komunálního odpadu. Tyto projekty jsou povětšinou na začátku realizace.

Všechny tyto data se shromažďují na cloudech. Odkud si může člověk stáhnout potřebné informace, předpovídat trendy atd. Využití jsou prakticky neomezená a je jenom otázka času než se více rozšíří. Všechny tyto využití zjednodušují administraci a zátěž na lidský prvek.

3 NÁVRH MĚŘENÍ PRO OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ IQRF SÍTĚ

3.1 Návrh topologie

Pro měření byly zvoleny následující členy topologie. Základní kámen topologie byl vybrán modul TR-72DAT, protože obsahuje integrovaný teploměr a má již integrovanou anténu, takže představuje jednotné i obecné řešení pro všechny sítě. Vzhledem k integrované anténě bude každý modul stejného typu dosahovat stejných vlastností. Na rozdíl od typu s pouze koaxiálním konektorem, na který je možné připojit jakoukoliv jinou anténu, takže by výsledky nebyly konstantní napříč všemi moduly. Koncové zařízení jsou emulovány vývojářským kitem DK-EVAL-04A, jenž nemá žádnou jinou alternativu. Jako další prvek topologie byla vybrána ethernetová brána GW-ETH-02A z důvodu nedostupnosti SIM karty pro GSM bránu, která by byla vhodnější, díky možnosti podrobnějšího otestování topologie terénu. Pro určité topologie byl potřeba i cloud. Cloud byl zvolen z hlediska hospodárnosti. CIS cloud je součástí IQRF řešení a byl použit pro úplnost topologie. Sít komunikovala s uživatelem skrze notebook. Veškeré programování modulů bylo prováděno skrze programovací kit CK-USB-04A.



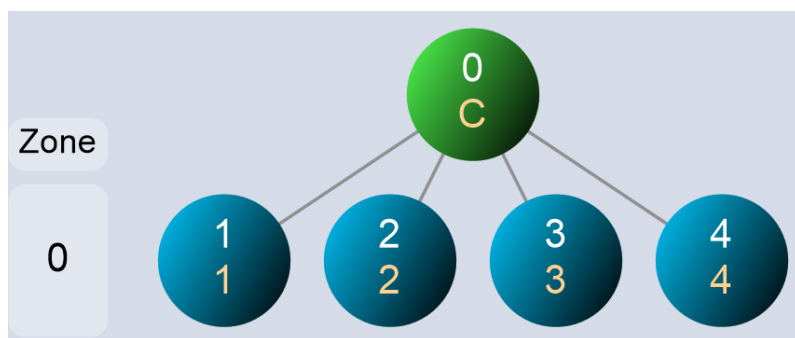
Obr. 3.1: Příklad topologie v RANu.

Topologie vycházejí ze tří následujících typů. Výchozí topologie je zvolena MESH, která se upravuje jednotlivým měřením. Základní bod v MESH topologii je Ethernetová brána (GW-ETH-02A), obsahující jeden TR-72DAT modul, výstup pro Ethernet a je napájena ze sítě pomocí microUSB. Brána je napojena na cloud (CIS cloud). Z cloudu jsou čtena data pomocí IQRF IDE, jenž poskytuje hlavní spojení mezi uživatelem a celou sítí. Z druhé strany je na bránu napojeno vícero modulů TR-72DAT. Tyto moduly tvoří samotnou MESH topologii. Každý z nich je napájen vývojářským

kitem DK-EVAL-04A. Tato topologie představuje nejsložitější možnou, jenž je použita v této práci. Zahrnuje všechny prvky a testuje síť od modulu po cloud.

Sekundární topologie představuje point-to-point. P2P topologie se skládá ze dvou možností. První z nich využívá dva TR moduly, jeden ve vývojářském kitu, druhý v programovacím. Modul v programovacím kitu slouží, jako koordinátor. Druhý modul zastupuje funkci jednotlivého uzlu. Druhá možnost P2P topologie je zapojení brány, jako koordinátoru. Druhý modul opět slouží jako jednotlivý uzel. Obě možnosti jsou ovládány skrze IQRF IDE na uživatelské stanici. Komunikace neprochází přes veřejný internet ani u jedné topologie.

Hybridní topologie slouží doplnkově k oběma topologiím. Pro některá měření je potřeba natolik modifikovat jednotlivé topologie, že již nemohou spadat pod ani jednu z výše uvedených. Proto je zde představena další. Může se jednat o bránu zapojenou do veřejné sítě, na kterou je napojen pouze jeden TR modul. Případně se může jednat o koordinátor zapojený v programovacím kitu na něž jsou napojeny dva TR moduly. Pokud se jedná o tuto topologii, vždy je uvedeno jaké členy topologie jsou součástí.



Obr. 3.2: Příklad logické topologie.

3.2 Metodologie měření

Hlavní části měření se dělí na vnitřní a vnější (indoor/outdoor). Všechna měření jsou provedena za stejných podmínek se stejnými zařízeními, odrážející výše nastíněné topologie. Pro účely měření jsou vybrány parametry, které co nejvíce přibližují vlastnosti sítě v daném zapojení. Hlavní parametry každého měření jsou zpoždění a RSSI. Odezva se měří na dvě zařízení pokud se jedná o MESH topologii, případně pokud topologie zahrnuje bránu a cloud. V těchto případech se měří odezva na bránu i na samotný modul. Dané odezvy jsou v grafech vyznačeny, jako REQ/-GATE pro alternativu, kde je vyslán požadavek a brána na požadavek odesílá tzv. confirmation paket(potvrzovací paket). Tento typ odezvy ukazuje zpoždění mezi

bránou a uživatelem přes veřejnou síť a cloud. REQ/RESPONSE vyznačuje odezvu mezi požadavkem a odpovědí od samotného modulu, tudíž ukazuje, jak velké zpoždění figuruje na celé cestě. Alternativně může druhý zmíněný název znamenat pouze odezvu mezi koordinátorem a modulem u P2P topologie. Druhý nejdůležitější parametr je RSSI (síla přijatého signálu), který je odečítán přímo na modulu pomocí funkce checkRF(). Pozice modulů jsou standardně na jednom místě pro zaručení konzistence. Při odečítání RSSI se hodnota průměruje z deseti neměřených pro zajištění, co nejvíce směrodatných výsledků. Některé z měření jsou zaměřena na určitou vlastnost architektury IQRF. Pro tyto měření jsou vždy speciálně určené podmínky, jenž pomohou demonstrovat vlastnosti sítě IQRF. U každého z měření, kde to je možné, se nachází simulace a následně reálné výsledky. Simulace slouží, jako teoretický podklad, o nějž se opírá reálné měření. Simulace jsou vypracovány ve dvou různých programech. Jeden je určený pro venkovní simulace a druhý se zaměřuje na vnitřní prostory. Pro každý simulační program je potřeba vytvořit model antény připevněné na modulu. Anténa je vytvořena v obou softwarech na základě technických zpráv použitých modulů. Při parametrizaci je kladen důraz na co nejvíce odpovídající výsledný model antény. Díky tomu je možné považovat simulace za dobrý styčný bod pro reálné měření. K anténě je také dokreslena vyzařovací charakteristika, díky které jsou simulační programy schopny lépe vyhodnotit šíření signálu. Z této charakteristiky plyne, že anténa má lepší vlastnosti ve vertikální poloze. Z tohoto důvodu všechny moduly zúčastněné v měření jsou vždy ve vertikální poloze. Dostupná data také udávají minimální možnou sílu přijatého signálu -104 dBm. Pokud jsou hodnoty nižší jedná se již o nepřesnosti.

Název simulačního programu pro indoor měření je Wireless INsite. Tento software je schopen modelovat chování jakéhokoli radiového zdroje v různých prostředích. Jako podklad vždy slouží plány budovy, podle kterých je vytvořený model v samotném softwaru. V daném modelu je možné upravovat různé parametry, jako je tloušťka zdí, přítomnost dveří či oken atd. Díky těmto vlastnostem jsou simulace z programu velice přesné a lze je považovat za validní zdroj informací.

Druhý použitý simulační program se nazývá Tower Coverage. Jedná se on-line nástroj pro modelování šíření signálu ve venkovních lokalitách. Simulace jsou spouštěny na vzdáleném serveru. Tento program je hlavně využíván pro mapování pokrytí mobilních sítí, ale je plně dostačující pro účely této práce. Poskytuje možnosti parametrizace antény a exportu dat do Google Earth map, díky čemuž je poměrně jednoduché získat simulovanou mapu pokrytí. Zároveň pracuje s reálnými daty, jako jsou polohy budov nebo převýšení.

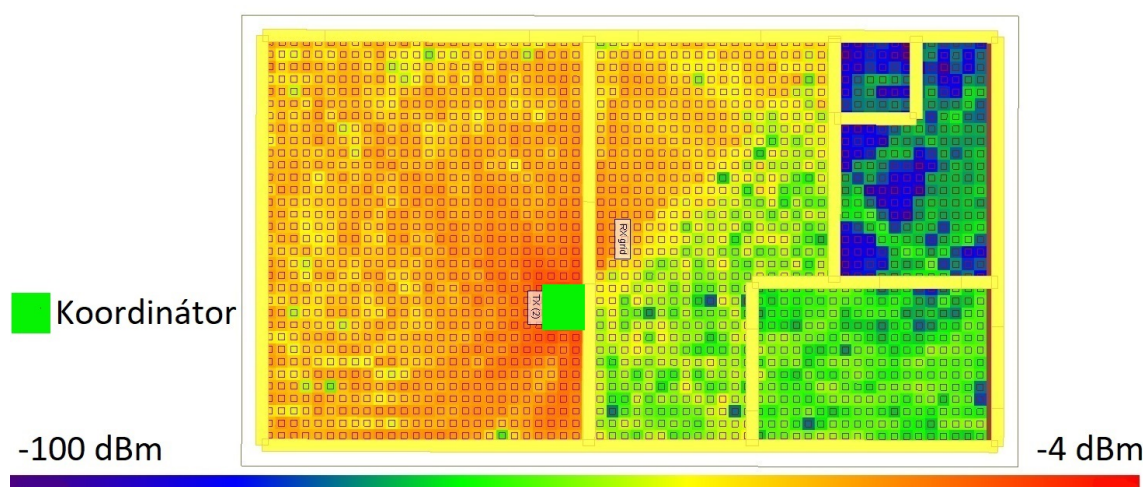
4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE

Experimentální měření obsahuje tři hlavní sekce. První je zaměřená na vnitřní prostředí tzv indoor. Tato část primárně slouží pro emulaci malých kancelářských prostor, případně pro emulaci schopností IQRF se vypořádat s přechody mezi patry. Druhá část se věnuje testování ve venkovních prostorách (zástavba). Zde lze pozorovat vhodnost IQRF v použití jako jsou pouliční lampy nebo podzemní garáže. Je zde také věnován prostor měření, které testuje IQRF v kopcovitém terénu. Poslední část se zabývá různými aspekty IQRF architektury. Například, jak se IQRF zachová při výpadku uzlu nebo chování při zahlcení sítě požadavky. Všechny data jsou sbírána pomocí DPA protokolu, který je plně dostačující pro topologii tohoto rozsahu.

4.1 Ve vnitřních prostorách (indoor)

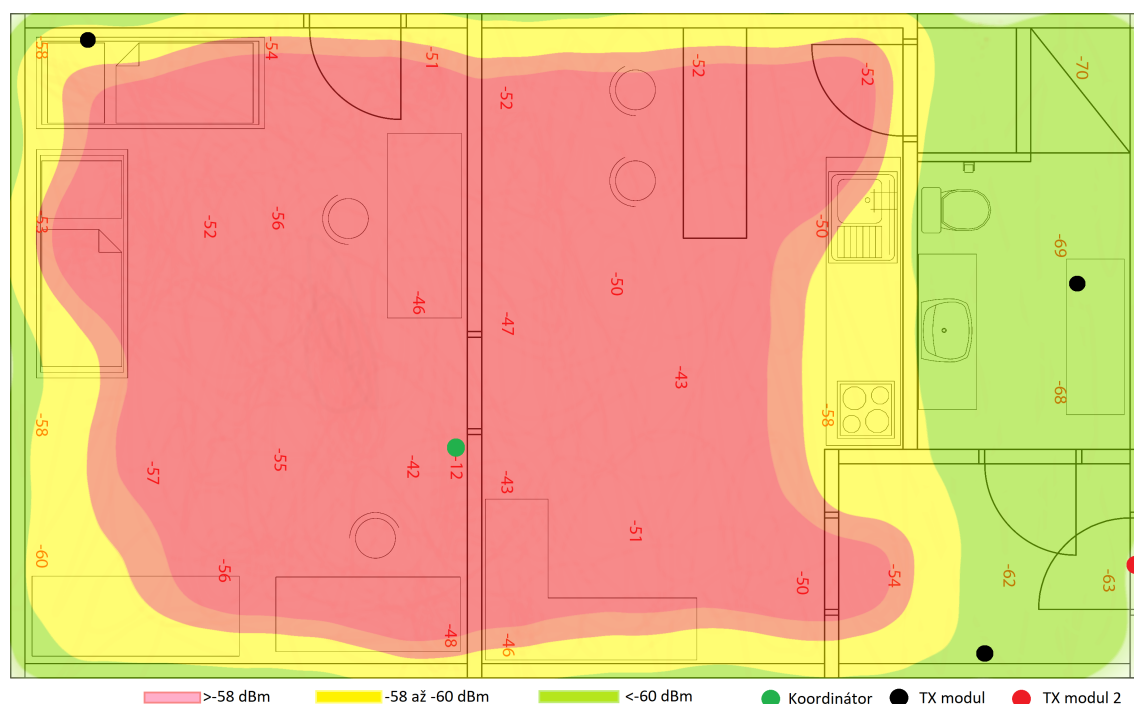
4.1.1 Šíření signálu ve vnitřních prostorách

První měření ve vnitřních prostorách se zaměřuje na šíření signálu v malých kancelářských prostorách. Pro účely tohoto měření byl vytvořen model malé kanceláře v programu Wireless InSite, v němž byla provedena simulace (viz níže). Ze simulace je patrné, že při nejvyšším výkonu by se měly hodnoty pohybovat okolo -90 dBm v největší vzdálenosti od zdroje signálu a -4 dBm při nejmenší možné vzdálenosti od zdroje. V extrému může dosahovat až -100 dBm. Hodnota -100 dBm se již blíží nejmenší možné hodnotě přijímaného signálu u IQRF. Z tohoto důvodu byly zvolené prostory vyhovující. Model byl sestaven aby co nejvíce přibližoval reálný stav. Jsou zde vzaty v potaz dveře, stěny i okna.



Obr. 4.1: Simulace pro kancelářské prostory při TX 7.

Pro reálné měření byla vytvořena heatmapa s vloženými průměrovanými hodnotami. Měření opisuje simulaci v rozprostření síly signálu, ale úbytek není ve skutečnosti, tak markantní. Na místě koordinátoru má RSSI hodnotu -12 dBm. V pokoji, ve kterém se nachází vysílač simulace odpovídá realitě. V druhém pokoji jsou již patrné odchylky. Největší odchylka je za zdí, která dělí oba pokoje, kde simulace předpovídala značný úbytek síly signálu. Realita tomu neodpovídá a IQRF si dobře drží signál i v druhém pokoji. Problém nastává až v překročení druhé zdi, kdy síla přijatého signálu dosahuje -70 dBm, což je ale stále dobrá hodnota, která nebrání v běžné funkčnosti IQRF. Od simulace se liší o celých 20 dB. Tato odchylka již představuje značně zavádějící hodnotu a tudíž pro třetí místnost je simulace naprosto nepřesná a nevyhovující. Z měření vyplývá, že IQRF si dobře drží sílu přijatého signálu ve vnitřních prostorách a průchody zdí nepředstavují značné riziko pro budování IQRF sítě. Díky tomu se zde nabízí možnost využít menší vysílací výkon a šetřit tak energií. Pro stejné prostory bylo měření zopakováno vícekrát a minimální možný výkon, pro prokrytí celého objektu, byl na úrovni 3, což odpovídá efektivně vyzářenému výkonu -12 dBm [3]. Pro tento výkon je síla přijatého signálu v nejvzdálenějším místě od zdroje signálu -92 dBm, což lze považovat za dostačující hodnotu pro bezproblémovou komunikaci.



Obr. 4.2: Reálné výsledky pro kancelářské prostory při TX 7.

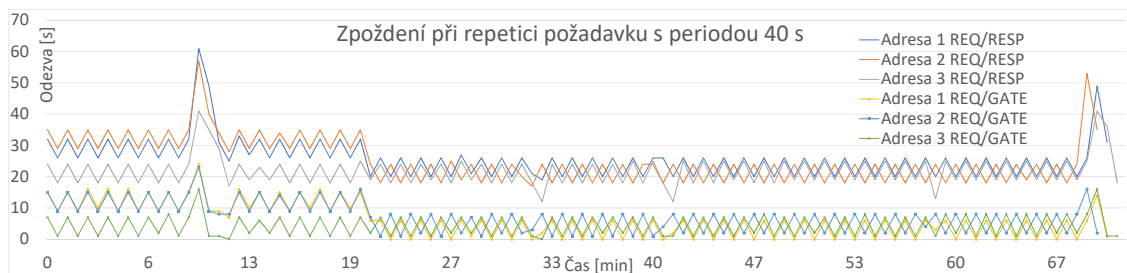
Rozšířením prvního měření vzniká nové, které do sebe zahrnuje i šíření ve vertikálním směru. Vzhledem k vyvrácení výsledků simulace v prvním měření, zde již nebude průběh simulován, protože simulace po průchodu druhou zdí začíná být nepřesná. Měření se odehrává v P2P konfiguraci. Prostory jsou stejné, s tím rozdílem, že jsou děleny jednotlivými podlažími. Podlaží jsou dělena stropem o průměru 30 cm a schodištěm. Modul v roli koordinátora se nachází ve stejné pozici jako na Obr. 4.2 v pátém podlaží. Druhý modul je polohován v nižších podlažích na stejném místě, u východu z objektu (vyznačeno červeným bodem na Obr. 4.2)¹. Na stejném podlaží, jako se nachází koordinátor, síla přijatého signálu dosahuje -70 dBm. Tato hodnota i logicky doplňuje předchozí měření a je s ním v korelaci, proto je brána, jako referenční pro ostatní podlaží. Při průchodu signálu o jedno podlaží dolů nastává úbytek o 8 dB vůči referenční hodnotě. Vzhledem k průchodu přes strop je tento úbytek minimální a koordinátor na vyznačené pozici (4.2) stačí k pokrytí alespoň dalšího patra. O dvě podlaží dolů si stále IQRF drží dostatečný signál s úbytkem vůči referenční hodnotě o 14 dB, což po odečtení dává hodnotu -84 dBm. Pokud je modul přenesen ještě o jedno podlaží dolů nastává již markantní pokles k -102 dBm. Tato hodnota se již nedá považovat za dostatečnou při reálném nasazení IQRF. Z předcházejících hodnot lze uvozovat dostatečné pokrytí signálem, pouze s jedním modulem, přes minimálně dvě podlaží. Pokud by byl umístěn další modul do podlaží se silou přijatého signálu -84 dBm, bylo by možné opět rozšířit pokrytí o 100% vůči původní hodnotě.

4.1.2 Standardní odezva ve vnitřních prostorech

Další měření se zabývá standardní odezvou ve vnitřních prostorech. Rozestavení modulů je zobrazeno na Obr. 4.2 černými body. Zelený bod představuje koordinátor. Jedná se o měření v MESH topologii s téměř simultánně posílanými požadavky na jednotlivé moduly. Zvolený interval požadavku na modul je 40 s. V první části měření probíhají na pozadí souběžně s IQRF i datově náročné aplikace. Po dvaceti minutách je jejich činnost ukončena.

Z grafu (viz 4.3) je patrné, že na počátku měření bylo zpoždění i proměnlivost zpoždění značně větší v porovnání se zbytkem měření. Průměrné zpoždění se pohybovalo okolo 30 s pro vzdálenější dva moduly a okolo 22 s pro modul nejbližší ke koordinátoru. Zpoždění na bránu opisuje stejný průběh, akorát velikost zpoždění se liší, v průměru o 17 s vůči zpoždění na modul. Po vypnutí datově náročných aplikací se zpoždění i jitter markantně snížily a ustálily. Pro oba vzdálenější moduly se hodnoty snížily o 30%. Pro nejbližší modul se zpoždění ani jitter nemění a zůstávají stejné, což je s největší pravděpodobností dáno vzdáleností od zdroje signálu,

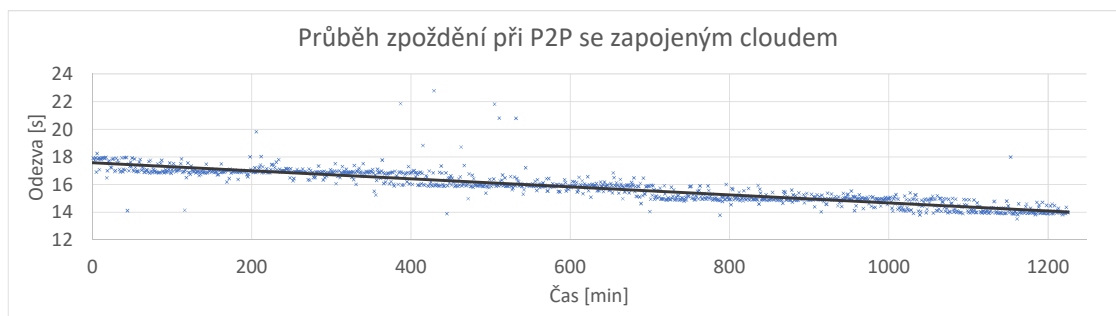
¹Modul se vždy nachází za východem a tudíž signál prochází východovými dveřmi



Obr. 4.3: Standardní průběh odezvy při posílání požadavků na moduly.

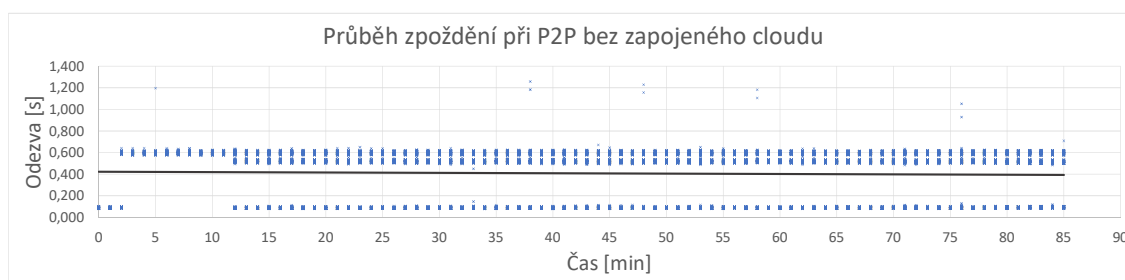
kteřá zaručuje nejspolehlivější komunikaci mezi bránou a modulem. Po zbytek měření (po vypnutí datově náročné aplikace) je průměrná hodnota zpoždění a jitteru konstantní pro všechny moduly i bránu. V průběhu měření jsou patrné dvě anomálie. První je způsobena kolísáním vytížení veřejné sítě. Zde se hodnota zpoždění dostala až k 1 minutě, což je již značné zpoždění a mělo by být bráno v úvahu. Druhá anomálie se nachází na konci měření. Je způsobena konečnou manipulací se sítí IQRF a jejím vypínáním.

Pro porovnání s předcházejícím měřením je další měření zaměřeno na odezvu ve stejném prostředí, ale pouze na jeden modul v P2P konfiguraci se zapojením cloudu (4.4) a bez zapojení cloudu (4.5). Průměrné zpoždění na modul v P2P topologii s cloudem je 16 s. Při porovnání zpoždění s předcházejícím měřením je patrné, že vzhledem k přítomnosti pouze jediného prvku je i samotné zpoždění menší minimálně o 4 s a v průběhu dne se stále snižuje. Dané snižování může být spojeno s lepší odezvou veřejné sítě, protože měření probíhalo hlavně přes noc. Ani proměnlivost zpoždění není tak vysoká jako v předchozím měření, což lze pozorovat na celkovém rozptýlení jednotlivých bodů. Maximální jitter se rovná 2 s. U tohoto měření je také sledována ztrátovost. Pro 1226 požadavků došlo 1226 odpovědí, což ve výsledku znamená 100% spolehlivost při posílání jednoho požadavku na modul za minutu po dobu 20 hodin. Celkově má síť lepší parametry v tomto uspořádání než v předešlém, což je i logické.



Obr. 4.4: Zpoždění při P2P topologii se zapojeným cloudem.

Níže je znázorněn průběh zpoždění, které bylo naměřeno bez přítomnosti cloudu v topologii. V kontrastu s předcházejícím měřením je ihned patrné, že zpoždění se měří na milisekundy. Pokud dochází ke sběru dat pouze v lokální síti, tak zpoždění nepřekračuje 1 s. Průměrná hodnota zpoždění je 400 ms. Ke sběru informací dochází opravdu rychle a nedochází k zahlcení. Požadavky na modul jsou v tomto měření posílány s intenzitou 69 požadavků za minutu a na žádný ze sledovaných parametrů tento údaj neměl vliv. Jako u předchozího měření i zde byla sledována ztrátovost. Na 8539 požadavků dorazilo 8536 odpovědí. Z toho vychází spolehlivost přenosu 99,96%.



Obr. 4.5: Zpoždění při P2P topologii bez zapojeného cloudu.

4.2 Ve vnějších prostorech (outdoor)

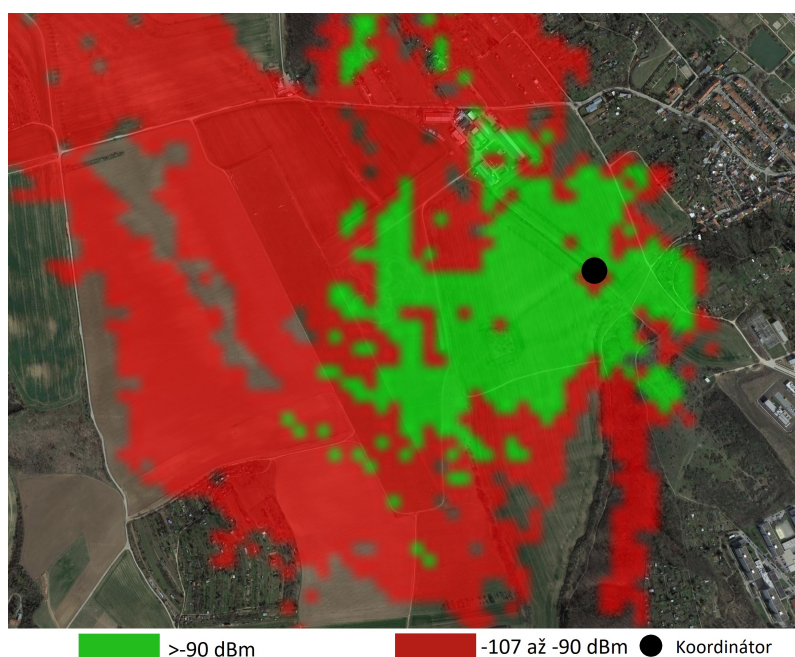
4.2.1 Maximální možný dosah

První měření pro vnější prostory je zvolena P2P topologie, pro určení maximální možné vzdálenosti při, které ještě probíhá komunikace. Oba moduly se nachází ve stejné výšce, přímé viditelnosti a stejné nadmořské výšce. Dle tabulkových hodnot by IQRF mělo dosahovat hodnot okolo 500 m. Simulace předpovídá hodnotu 380 m. Při této hodnotě by mělo stále docházet k bezproblémové komunikaci, ale síla přijatého signálu by už měla být menší než -90 dBm.

Výsledek odpovídá přesně simulované hodnotě. Komunikace ustala v bodě nacházejícím se přesně 379 m od koordinátoru. Obě antény se nacházely ve výšce 2 m a měly nastaveny stejný vysílací výkon 9 dBm. Simulace naznačovala problémy s komunikací již blíže k vysílači, ale ztrátovost po ustálení modulu byla nulová, takže k žádným problémům nedošlo. Po překonání 380 m již komunikace nebyla navázána. Hodnota RSSI se pohybovala okolo -100 dBm, což již nelze považovat za dobrou hodnotu pro praktické využití, ale pro určení maximálního možného dosahu je postačující.

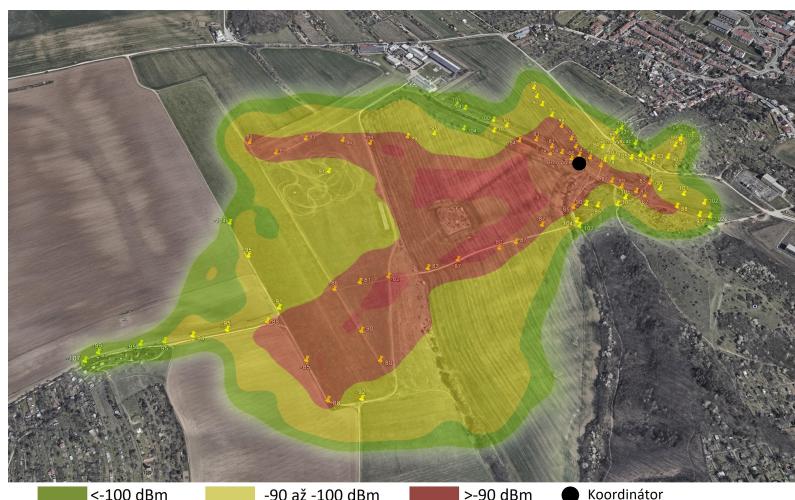
4.2.2 Šíření signálu v otevřeném a kopcovitém terénu

Druhé měření ve venkovních prostorech se zaměřuje na šíření signálu v otevřeném a kopcovitém terénu. Simulace předpovídá velkou penetraci signálu po celé krajině. Na všechny světové strany od zdroje signálu (vyznačený černým bodem na Obr. 4.6) se nachází hornatý terén. V pravé části obrázku se druhý modul nachází ve vyšší nadmořské výšce vzhledem k styčnému bodu. V levé části obrázku se nachází naopak v menší nadmořské výšce. Z těchto důvodů je propagace na východní stranu značně omezená, naproti tomu rozprostření signálu na jihozápadní a západní stranu je mnohem větší.



Obr. 4.6: Simulace šíření signálu v otevřeném a kopcovitém terénu.

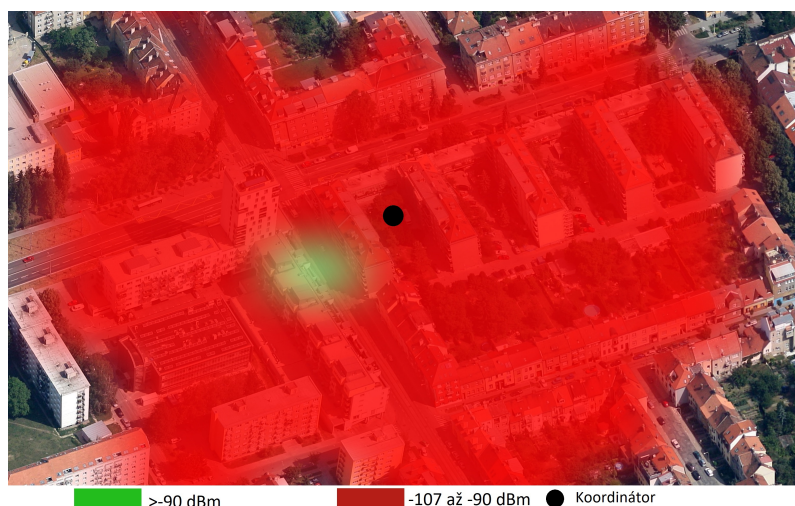
Níže lze najít heatmapu s reálnými výsledky viz 4.7. Pokud je srovnána se simulací, na první pohled lze pozorovat velkou podobnost. Ačkoliv simulace byla optimističtější, ani reálné výsledky nelze považovat za nedostatečné. I přes malou velikost antény, byl modul schopen pokrýt celé údolí signálem -90 dBm, který je ještě stále dostačující pro bezproblémovou komunikaci. Signál se špatně šíří na severní a východní stranu, kde to je očekávané vzhledem k nutnosti šířit signál do vyšší nadmořské výšky a přes horizont. Jakmile se druhý modul ocitne za kopcem, tak komunikace okamžitě ustává. Na druhou stranu se signál šíří mnohem ochotněji a v nejzazším bodě jsou od sebe moduly vzdálené 1 117 m, což dalece převyšuje maximální dosah, který byl naměřen, když jsou oba moduly ve stejné nadmořské výšce. Naopak minimální vzdálenost je pouhých 145 m, což zapříčiňuje hornatý terén a zároveň přesně odpovídá simulovanému chování.



Obr. 4.7: Reálné šíření signálu v otevřeném a kopcovitém terénu.

4.2.3 Šíření signálu v zástavbě

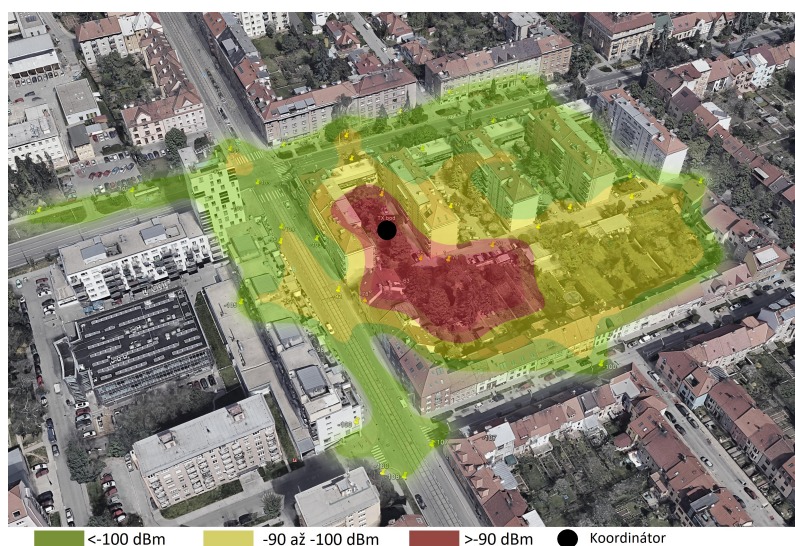
Třetí měření se zabývá problematikou šíření signálu IQRF v zástavbě. Zástavba je pro šíření signálu největší problém, kvůli všudypřítomným překážkám. Teoretický podklad tvoří simulace viz 4.8. Oproti měřením výše je na první pohled patrné podstatné snížení dosahu signálu. Ze simulace vychází, že pro celý blok by měla být síla signálu pod -90 dBm, až na nejbližší místa ke koordinátoru. Takto slabý signál již nelze považovat za dostatečný a prakticky využitelný.



Obr. 4.8: Simulace šíření signálu v zástavbě.

Níže je opět zpracována heatmapa znázorňující reálné šíření signálu viz 4.9. Černý bod představuje umístění koordinátoru. Signál se reálně šíří o něco lépe než simulace předpovídá. V blízkosti modulu nenastává žádný problém a signál si drží svoji

standardní úroveň nad -90 dbm. Jakmile signál prochází budovou nastává okamžitý úbytek o 15 dB. Posléze se již nedá hovořit o kvalitním a použitelném signálu pro praktické využití. Z těchto údajů plyne, že integrovaná anténa na daném modulu je příliš slabá pro použití v husté zástavbě. Ale při správném polohování modulu ve žlutě zvýrazněných zónách je možnost dosáhnout -90 dBm, díky čemuž by zde ještě mohla být síť prakticky využitelná i s tímto modulem.

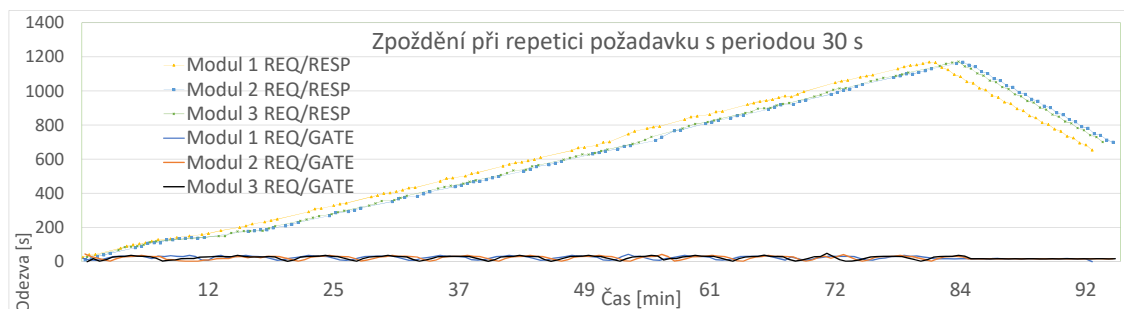


Obr. 4.9: Reálné šíření signálu v zástavbě.

4.3 Demonstrační měření

4.3.1 Náchylnost na zahlcení sítě

Jako první demonstrační měření je zvoleno měření, které naznačuje chování sítě při příliš mnoha požadavcích. Interval pro posílání požadavků na modul je 30 s. Rozestavení modulů je vyznačeno černými body na obrázku 4.2.



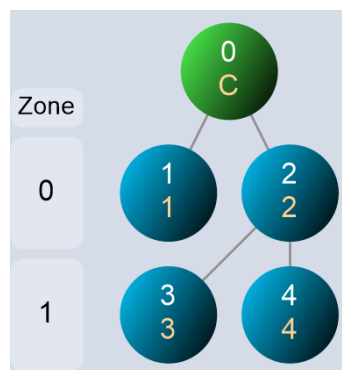
Obr. 4.10: Průběh odezvy při opakování požadavku s periodou 30 s.

Z grafu je patrné, že pokud je interval 30 s pro posílání požadavku na jednotlivé moduly, tak síť začíná být velice rychle zahlcena. Již po třech minutách začíná být zpoždění odpovědi od modulu znatelné a dosahovat 80 s. Zpoždění dále velmi rychle stoupá. Po 25 minutách již dosahuje zpoždění 5 minut. Tyto data jsou již bezcenná vzhledem k tak velkému zpoždění. Bohužel ani po 5 minutách se stav nezlepšuje a zpoždění stále stoupá. V osmdesáté minutě je ukončeno posílání požadavků, proto je zpoždění na bránu nulové. V této chvíli začne klesat i zpoždění na samotné moduly. Maximální zpoždění na modul dosahuje dvaceti minut. Při této hodnotě již s daty nejde operovat, jako s validními a jsou zbytečná. IQRF nabízí řešení tohoto problému, ale je patrné, že pokud se vysílají jednotlivé požadavky zvlášť na každý modul, tak je síť velmi náchylná na zpoždění. Zajímavé je, že brána neměla žádný problém požadavky zpracovat a nedocházelo u ní ke zvýšení zpoždění. Až samotná síť nebyla schopná pojmout tolik požadavků najednou.

4.3.2 Konvergence sítě

Druhé měření demonstruje konvergenci sítě při výpadku uzlu. Logická topologie náchylná na výpadek uzlu může vypadat následovně 4.11. Pokud se jedná o topologii znázorněnou na obrázku 3.2, tak je evidentní, že výpadek jakéhokoli uzlu nenaruší funkčnost celku. V případě první zmíněné topologie výpadek uzlu číslo dva by mohl způsobit nefunkčnost 75% celé sítě. Z tohoto důvodu byla testována konvergence, právě při výpadku uzlu číslo 2. Nejprve byla sestavena a ověřena funkčnost celé sítě jako celku. Na uzlech 3 a 4 bylo naměřeno RSSI -70 dBm. Na prvních dvou uzlech byla tatáž hodnota. Všechny uzly od sebe dělilo alespoň jedno podlaží, ale 3. a 4. uzel se nacházeli na stejném místě. Následně byl vypnut druhý uzel. Síť bez problémů konvergovala a automaticky začala probíhat komunikace přes první uzel. Jediné RSSI se změnilo z důvodu větší vzdálenosti mezi jednotlivými uzly. Nyní bylo naměřeno na 3. a 4. uzlu -90 dBm. Z těchto výsledků lze uvozovat, že pokud některý modul vypadne a jiný modul je v dosahu, tak IQRF daný modul najde a přesměruje na něj veškerou komunikaci, která by jinak byla zahozena. Z tohoto důvodu je možné považovat síť IQRF za odolnou proti výpadku.

U tohoto měření bylo zároveň posuzováno, jak IQRF síť reaguje na změnu polohy jednotlivých modulů. Oficiální zdroje předpokládají, že pokud dojde ke změně polohy některého modulu, tak komunikace se zbytkem sítě začne být problémová. Tento předpoklad se nepotvrdil. Při změně pozice jednoho ani všech modulů nebyl zaznamenán žádný problém. Bohužel tento předpoklad nelze na 100% vyvrátit vzhledem k velikosti testovací topologie. (Problematika mobility sítě IQRF by tedy měla být ještě předmětem dalšího měření s rozsáhlejší topologií.)

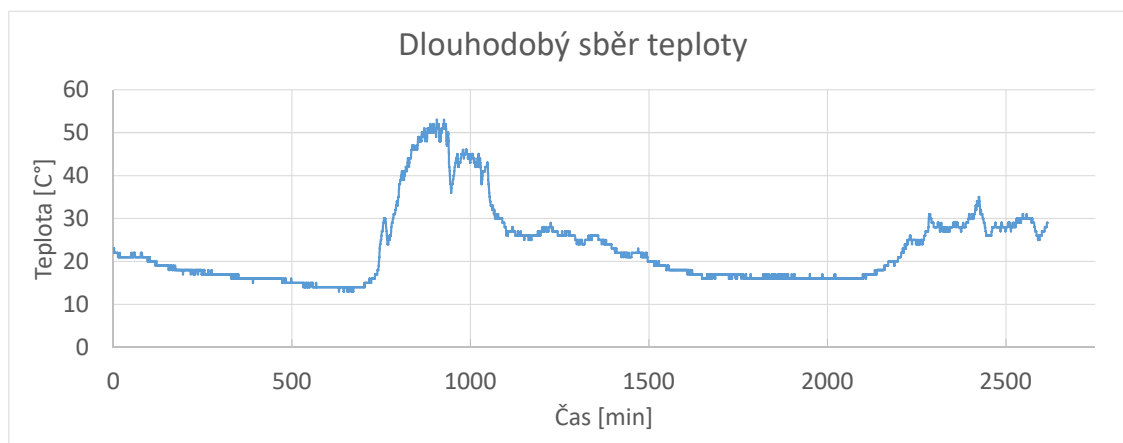


Obr. 4.11: Logická topologie náchylná na výpadek.

4.3.3 Dlouhodobý sběr teploty

Praktický příklad využití IQRF je monitorování teploty. Z tohoto důvodu je zde zahrnuto i toto měření. Teplota má standardní průběh, akorát v dopoledních hodinách dosahuje hodnoty nad 50 C°. Tento jev je způsoben přímou sluneční září na modul, ten se zahřál a tudíž čidlo nepodávalo přesné výsledky. Integrovaný teplotní senzor jinak vykazoval velmi přesné výsledky po celou dobu měření.

Součástí tohoto měření bylo také sledování vybíjení baterie vývojářského kitu. Baterie vydržela napájet modul po dobu 48 hodin při jednom požadavku na modul za minutu. Po 48 hodinách začala komunikace vypadávat. Na začátku došla každá 6 odpověď a tento trend se zhoršoval, až po 96 hodinách ustala komunikace úplně.



Obr. 4.12: Vývoj teploty po dobu 48 hodin.

5 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo navrhnout a ověřit radiovou síť typu MESH pro bez licenční pásmo. V úvodu byl věnován prostor základním technikám a technologiím v telekomunikacích. Pro pokračování práce bylo zvoleno IQRF, jako zástupce IoT technologií, na kterém byly demonstrovány různé elementy a vlastnosti MESH sítě. Druhá kapitola se zabírala představením IQRF. Díky těmto znalostem mohla být v další kapitole navržnuta topologie a postupy pro měření vlastností IQRF sítě. Následující kapitola se již zabývala samotným měřením.

První měření se soustředilo na chování IQRF sítě ve vnitřních prostorech. Byla zpracována simulace šíření signálu, která posloužila, jako základ pro reálné měření. IQRF síť si vedla velmi dobře a pro pokrytí malého bytu stačí ve výsledku používat mnohem menší sílu signálu, než kterou IQRF umožňuje. Signál IQRF se také šíří dobře vertikálně. Byla zde také vyhodnocována odezva. Pokud se jedná o topologii, do které je zařazen i cloud, je potřeba počítat s náchylností na okolní využití sítě a na zvýšené zpoždění dosahující až 20 s. Tento problém by mohl být částečně kompenzován komerčním řešením cloudu nebo pouze lokálním sběrem dat (tj. bez cloudu), která by mohla být až poté nahrávána na cloud.

Druhá část měření se věnovala chování IQRF v otevřených prostorech. Pokud je zdroj signálu umístěn na vyvýšenině, tak IQRF nemá problém s pokrytím velké plochy v otevřeném prostranství. Pokud se jedná o nasazení v zástavbě, tak je potřeba zvážit jiný modul než, který byl použit v této práci. V zastavěných lokalitách velice rychle klesá síla přijatého signálu na všechny strany. Tento problém lze řešit i s modulem použitým v této práci, akorát je nezbytné jich použít vždy více pro posílení signálu například za určitou budovou.

Třetí část měření byla věnována demonstračním měřením. V těchto měřeních byla dokázána náchylnost sítě na rychle zahlcení. Tento problém je naštěstí řešen pomocí FRC příkazu. Síť je schopná bez problémů konvergovat, pokud je dostupný modul s dostatečně silným signálem. Nakonec byla provedena ukázka praktického použití IQRF. Teplotní čidla na modulech jsou velmi přesná, ale je potřeba věnovat pozornost, aby nebyla na přímém slunci.

Možné pokračování této práce se může věnovat rozšíření topologie o dalších 10 modulů a pozorovat náchylnost na výpadky signálu, konvergenci a možnost mobility daných modulů. Byla by zde také možnost lépe otestovat vlastnosti v MESH topologii, pokud by bylo více dostupných modulů. Další možnost pokračování je měření v podzemních garážích, za předpokladů zveřejnění plánů veřejných budov.

LITERATURA

- [1] Channel Access Method. [online]. 2013 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://goo.gl/mQYYhV>.
- [2] DPA framework. *www.iqrf.org* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/technology/dpa>.
- [3] (DC)TR-72D: Data Sheet. *www.iqrf.org* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/products/transceivers/tr-72d>.
- [4] DS-DPA-02. *www.iqrf.org* [online]. 2015 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/products/development-tools/development-sets/ds-dpa-02>.
- [5] FARUQUE, Saleh. *Radio frequency modulation made easy*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016, 104 s. ISBN 978-331-9412-009.
- [6] FEKI, Mohamed Ali, Fahim KAWSAR, Mathieu BOUSSARD a Lieven TRAPPENIERS. The Internet of Things: The Next Technological Revolution. Computer. 2013, 46(2), 24-25. DOI: 10.1109/MC.2013.63. ISSN 0018-9162. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6457383/>
- [7] GLOVER, Fred, Micheal LEE a Jennifer RYAN. Least-cost network topology design for a new service. Annals of Operations Research. 1991, 33(5), 351-362. DOI: 10.1007/BF02073940. ISSN 0254-5330. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02073940>
- [8] GW-ETH-02A: User's Guide. *www.iqrf.org* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/products/gateways/gw-eth-02a>.
- [9] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. 135 s. ISBN 80-214-1833-8.
- [10] How OFDM Subcarriers Work <http://www.revolutionwifi.net> [online]. 2015 [cit. 2017-5-3] Dostupné z: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work>.
- [11] IQRF Cloud (CIS Cloud). *www.iqrf.org* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/technology/iqrf-cloud>.
- [12] IQRF IDE: Integrated development and service environment. *www.iqrf.org* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/technology/iqrf-ide>.

- [13] IQMESH: Mesh topology. *www.iqrf.org* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/technology/iqmesh>.
- [14] KUČHTA, Radek, Radimir VRBA a Vladimír SULC. IQRF Smart Wireless Platform for Home Automation: A Case Study. 2009 Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications. IEEE, 2009, , 168-173. DOI: 10.1109/ICWMC.2009.35. ISBN 978-1-4244-4679-7. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5279506/>
- [15] LATHI, B. P. *Modern digital and analog communication systems*. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 1998, 800 s. ISBN 01-951-1009-9.
- [16] Mobilní internet v České republice. *www.mobilmania.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.mobilmania.cz/clanky/tak-sel-cas-s-mobilnimi-daty-v-cr/sc-3-a-1329162/default.aspx>.
- [17] Modulace OFDM. <https://coptkm.cz> [online]. 2009 [cit. 2017-1-5]. Dostupné z: <https://goo.gl/xb93MK>.
- [18] Modulation. <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/> [online]. 2005 [cit. 2017-1-5]. Dostupné z: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/modulation>
- [19] Smart parking. *www.iqrf.org* [online]. 2015 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/iqrfabout/case-studies/smart-parking>.
- [20] Street LED lighting. *www.iqrf.org* [online]. 2015 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/iqrfabout/case-studies/street-led-lighting>.
- [21] Wireless CO2 sensor. *www.iqrf.org* [online]. 2015 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/iqrfabout/case-studies/wireless-co2-sensor>.
- [22] Technologie vhodné pro IoT. <Http://www.iot-portal.cz> [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.iot-portal.cz/technologie>.
- [23] Topologie sítí. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Topologiesítí>.
- [24] Two application approaches. *www.iqrf.org* [online]. 2015 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/technology/2-application-approaches>.
- [25] YAN-E, Duan. Design of Intelligent Agriculture Management Information System Based on IoT. 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. IEEE, 2011, , 1045-1049.

DOI: 10.1109/ICICTA.2011.262. ISBN 978-1-61284-289-9. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/5750779/>

- [26] Základní principy přenosu dat. <http://www.cs.vsb.cz> [online]. 2017 [cit. 2017-1-4]. Dostupné z: <http://www.cs.vsb.cz/grygarek/PS/lect/fyzPrincipy.html>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DPA	Direct Peripheral Access
P2P	Peer-To-Peer
FRC	Fast Response Command
HWP	Hardware Profile
IoT	Inthernet of Things
IDE	Integrated Development Environment
GW	GateWay
DCTR	Data Controlled Transceiver
TDM	Time Division Multiplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
CDM	Frequency Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
ASK	Amplitde shift keying
FSK	Frequency shift keying
PSK	Phase shift keying
QAM	Qadrature amplitude modulation
RAN	Radio Access Network

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD

51

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Přiložené CD obsahuje elektronickou verzi bakalářské práce.